

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

**VYUŽITÍ RECYKLOVANÝCH
UHLÍKOVÝCH VLÁKEN PRO FILTRACI
ZA VYSOKÝCH TEPLOT**

**USE OF RECYCLED CARBON FIBERS FOR
FILTRATION AT HIGH TEMPERATURES**

KHT - 107

LIBEREC 2012

Bc. LUCIE SKÁLOVÁ

P r o h l á š e n í

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce.

V Liberci dne 21.12.2011

.....

Poděkování

Je mou milou povinností poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jakobovi Hrůzovi, Ph.D. za odborné vedení a dohlížení nad prací. Dále bych také chtěla poděkovat za cenné rady a konzultace, které mi poskytl pan Filip Sanetrník a pan prof. Ing. Vladimír Prášil, DrSc.

V neposlední řadě poděkování patří hlavně mé rodině za pomoc a podporu, kterou mi dávali po celou dobu mého studia.

Anotace

Téma: Využití recyklovaných uhlíkových vláken pro filtraci za vysokých teplot

Náplní této diplomové práce je výroba vzorků filtrů s proměnlivými parametry plošné hmotnosti z recyklovaných staplových uhlíkových vláken, testování těchto filtrů, vyhodnocení filtračních vlastností a návrh možného použití těchto filtrů.

Rešeršní část práce popisuje výrobu a vlastnosti uhlíkových vláken, použití uhlíkových vláken v kompozitních materiálech pro letecký průmysl a možnost recyklace těchto kompozitů. Dále popisuje vlastnosti recyklovaných uhlíkových vláken v porovnání s vlákny primárními. V poslední části popisuje možné technologie výroby filtrů z recyklovaných staplových uhlíkových vláken.

Experimentální část popisuje postup výroby vzorků filtrů a použité testovací metody pro vzdušnou filtraci. Popisuje i hlavní parametry procesu filtrace a parametry filtračního materiálu – tloušťka, plošná hmotnost, průměr vláken atd. Dále znázorňuje, porovnává a vyhodnocuje výsledky hlavních filtračních vlastností – efektivita, tlakový spád, životnost filtru. V závěru navrhuje možné použití filtrů z recyklovaných uhlíkových vláken.

Annotation

Title: Use of recycled carbon fibers for filtration at high temperatures

The focus of this diploma thesis is the production of filter samples with variable areal weight parameters from recycled carbon stable fibers, testing of these filters, evaluating filtration properties and proposing further possible use for these filters.

The research section of this work describes the production process and properties of carbon fibers, the use of carbon fibers in composite materials for aviation industry and the possibilities for recycling these composites. It further describes the properties of recycled carbon fibers compared to the “Virgin” fibers. The last section describes the possible technologies used for producing the filters from recycled carbon stable fibers.

The experiment section containing the experiment, describes the process of producing sample filters and testing methods used for air filtration. It also elaborates on the main parameters of the filtration process and on the parameters of filtration material – thickness, areal weight, fiber diameter, etc. Furthermore, the work shows, compares and evaluates the results of main filtration properties - efficiency, pressure differential, filter life-cycle. The conclusion suggests possible use for filters from recycled carbon fibers.

Klíčová slova

Filtrace

Kompozit

Mechanické vlastnosti

Netkaná textilie

Recyklace

Uhlíkové vlákno

Key words

Filtration

Composite

Mechanical properties

Non-wovens

Recycling

Carbon fiber

OBSAH

OBSAH.....	7
ÚVOD.....	10
REŠERŠNÍ ČÁST	11
1. UHLÍKOVÁ VLÁKNA	11
1.1 HISTORIE.....	11
1.2 VÝCHOZÍ SUROVINA PRO VÝROBU	12
1.3 POSTUP VÝROBY	12
1.4 VÝROBNÍ SORTIMENT UHLÍKOVÝCH VLÁKEN.....	14
1.5 VLASTNOSTI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	14
2. KOMPOZITY	18
2.1 KOMPOZITY S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	19
2.2 APLIKACE UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ V LETECTVÍ [1]	21
3. RECYKLACE UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ	24
3.1 ZPŮSOBY RECYKLACE.....	24
3.1.1 PYROLÝZNÍ PROCES DEKOMPOZICE	25
3.1.2 DEKOMPOZICE KOMPOZITU UHLÍK-EPOXID [14]	28
3.2 APLIKACE RECYKLOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	29
3.3 VLASTNOSTI RECYKLOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	30
4. NETKANÉ TEXTILIE [16]	36
4.1 DEFINICE NETKANÝCH TEXTILIÍ DLE NORMY	36
4.2 KLASIFIKACE NETKANÝCH TEXTILIÍ	36
4.3 MECHANICKÉ ZPŮSOBY PŘÍPRAVY VLÁKENNÉ VRSTVY	38
4.3.1 VÁLCOVÝ MYKACÍ STROJ.....	38
4.3.2 VRSTVENÍ VLÁKENNÉ PAVUČINY	40
4.4 AERODYNAMICKÁ VÝROBA VLÁKENNÉ VRSTVY	41
4.5 MECHANICKO–AERODYNAMICKÁ VÝROBA VRSTVY	42
4.6 ZPŮSOBY ZPEVNŮVÁNÍ VLÁKENNÉ VRSTVY.....	43
4.6.1 TECHNOLOGIE VPICHOVÁNÍ	43

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	46
5. ANALÝZA DODANÝCH RECYKLOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN ...	47
5.1 PRŮMĚR VLÁKEN	47
5.2 DÉLKA VLÁKEN	48
6 VÝROBA SÉRIE POLOPROVOZNÍCH VZORKŮ FILTRU	49
6.1 VÝROBA A ZPEVNĚNÍ VLÁKENNÉ VRSTVY	49
6.2 PARAMETRY VYROBENÝCH FILTRŮ	51
6.2.1 PLOCHA FILTRU	51
6.2.2 TLOUŠŤKA FILTRU	51
6.2.3 PLOŠNÁ HMOTNOST FILTRU	52
6.2.4 STEJNOMĚRNOST MATERIÁLU	53
7 VYHODNOCENÍ FILTRAČNÍCH VLASTNOSTÍ VZORKŮ FILTRŮ	55
7.1 PARAMETRY FILTROVANÝCH ČÁSTIC	55
7.2 PARAMETRY PROCESU FILTRACE	57
7.3 TESTOVÁNÍ FILTRŮ	57
7.3.1 TEST AEROSOLEM NaCl	57
7.3.2 TEST SYNTETICKÝM PRACHEM – přístroj DFT-3	61
7.4 FILTRAČNÍ VLASTNOSTI	62
7.4.1 EFEKTIVITA	62
7.4.2 TLAKOVÝ SPÁD	64
7.4.3 ŽIVOTNOST FILTRU	65
8 APLIKACE FILTRŮ Z RECYKLOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	68
9 ZÁVĚR	71
POUŽITÁ LITERATURA	73
SEZNAM OBRÁZKŮ	75
SEZNAM TABULEK	77
SEZNAM ROVNIC	77
SEZNAM PŘÍLOH	78

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	[%]	tažnost
E	[Pa]	modul pružnosti
E	[%]	efektivita
F	[N]	síla
h	[m]	tloušťka materiálu
J	[g]	jímavost
p	[Pa]	tlakový spád
R_m	[GPa]	pevnost v tahu
S	[m ²]	plocha
T	[tex]	jemnost svazku
T_z	[°C]	teplota zpracování
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná vodivost
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
σ	[Pa]	tahové napětí
N_2		dusík
$NaCl$		chlorid sodný
NT		netkané textilie
PAN		polyakrylonitril
TUL		Technická univerzita v Liberci
VS		viskóza
$VZLÚ$		Výzkumný a zkušební letecký ústav a.s.

ÚVOD

S vývojem lidské společnosti, člověk poznával a naučil se používat nejrůznější materiály, jako jsou kámen, bronz, železo, dřevo, keramika a jiné přírodní suroviny. Podle nejčastěji používaných materiálů byly pojmenovány i epochy lidstva. Vývoj používaných materiálů se posouval a stále posouvá kupředu, dle toho, jak člověk zvyšuje své potřeby, nároky a úroveň.

Vyvíjí se a vznikají jednak nové materiály, ale i technologie zpracování těchto materiálů. Materiály se vzájemně spojují a kombinují s cílem dosáhnout lepších vlastností, než jsou vlastnosti jednotlivých složek. Tyto materiály nazýváme kompozity. Jsou to materiály, které předčily materiály vytvořené přírodou. Hlavními přednostmi kompozitů jsou odlehčená váha konstrukce, vyšší mechanická, fyzikální a chemická odolnost.

Ale jak už to bývá, nic není věčné, ani diamanty a jednoho dne i těmto skvělým kompozitním materiálům skončí jejich životnost. Co pak s nimi? Skládkovat a ničit si přírodu nebo spalovat a ničit si vzduch a zdraví? Zdraví je to nejcennější, co máme. Nejlepším řešením tedy, zároveň však nejtěžším a nejnákladnějším na provedení, je volba recyklace. Tímto tématem se v současné době zabývají laboratoře po celém světě. Hledají řešení, jak kompozity recyklovat tak, aby zůstaly zachovány výjimečné materiální vlastnosti jejich vyztužujících složek. Zároveň je potřeba pro tyto recykláty najít uplatnění, kde bude využito jejich zachovaných vlastností. Recyklovaná uhlíková vlákna již nelze použít do konstrukčních řešení, proč je ale nevyužít jinde?

Cílem této diplomové práce je pokusit se jedno z těchto řešení nalézt. Práce je členěna na část rešeršní a část experimentální. Celá práce je zakončena jednak samostatným závěrem, jednak návrhem možného uplatnění těchto recyklátů.

Rešeršní část seznamuje s uhlíkovými vlákny, jejich výrobou a jejich vlastnostmi, dále s kompozity používanými v leteckém průmyslu. Popisuje možnost recyklace kompozitů s vláknovou uhlíkovou výztuží a vlastnosti těchto recyklovaných uhlíkových vláken. Dále navrhuje možné technologie výroby netkaných textilií s ohledem na zpracování staplových vláken specifických parametrů a s ohledem na finální využití výrobku ve specifickém prostředí.

Experimentální část je věnována výrobě poloprovozních vzorků filtrů a samostatnému měření hlavních parametrů filtračních vlastností a následnému matematicko-statistickému zpracování a vyhodnocení naměřených dat. V závěru této části je nastíněna možnost případného využití filtrů z recyklovaných uhlíkových vláken.

REŠERŠNÍ ČÁST

1. UHLÍKOVÁ VLÁKNA

Uhlíková vlákna je souhrnný název pro vlákna obsahující uhlík v různých modifikacích, od amorfního uhlíku, přes planárně uspořádaný grafit až ke krystalickému diamantu. Jedná se o dlouhý, tenký pramen materiálu o průměru 5–10 μm složeného převážně z atomů uhlíku. Atomy uhlíku jsou spojeny dohromady v mikroskopické krystaly, které jsou více méně orientovány paralelně k dlouhé ose vlákna. Krystalové uspořádání způsobuje, že vlákno je na svou tloušťku velmi pevné. Uhlíková vlákna mají oproti skleněným vláknům menší průměry, lze tedy vlákna lépe ohnout, což můžeme použít při výrobě tkanin a pletenin, ačkoli jsou uhlíková vlákna křehčí než vlákna skleněná.

Speciální podskupinou jsou grafitová vlákna, která vznikají tepelným zpracováním při teplotách kolem 2400°C.

Vlákna mají průměrnou hustotu 1750 kg/m³. Od jiných textilních vláken se odlišují zejména výrazně menším modulem pružnosti v kolmém směru k ose vlákna. Uhlíková vlákna jsou křehká, jejich tažnost je menší než u skleněných vláken. Při ohřevu se uhlíkové vlákno zkracuje v kolmém směru, má však vyšší koeficient tepelné roztažnosti než sklo. V podélném směru mají uhlíková vlákna malý elektrický odpor.

V uhlíkových vláknech se pojí vysoká pevnost, modul pružnosti a tepelná odolnost s nízkou měrnou hmotností. [22]

1.1 HISTORIE

Nejdůležitější historické milníky ve výrobě uhlíkových vláken [1]:

1957 - první uhlíkové vlákno z viskózy v USA (Union Carbide)

1961 - první uhlíkové vlákno z polyakrylonitrilu (PAN) v Japonsku (společnost Toray)

1971 - komerční výroba uhlíkových vláken z PAN (Toray), výroba 12 tun/rok

1976 - počátek výroby uhlíkových vláken z mezofázových smol

2006 - vlákno z uhlíkových nanotrubiček (patent Los Alamos National Laboratory)

1.2 VÝCHOZÍ SUROVINA PRO VÝROBU

Uhlíková vlákna se vyrábějí řízenou pyrolýzou vhodných polymerních prekurzorů:

- Polyakrylonitrilová vlákna (PAN) – nejčastěji používaná vlákna pro výrobu
- Viskózová vlákna (VS) – nejlevnější vlákna
- Vlákna na bázi smol a dehtů, vznikajících ze zbytků při destilaci ropy a černého uhlí, zvláknována v tavenině - vlákna nejpevnější
- Vlákna fenol-aldehydová – Novoloid – nejnověji používaná vlákna

Dále lze vlákna vyrábět tepelným rozkladem uhlovodíků. Tato metoda se používá pro speciální vlákna.

Výrobní proces je velmi nákladný, za uhlíková vlákna se platí několikanásobně víc, než je cena obyčejného syntetického vlákna.

Z pohledu výtěžnosti vláken z prekurzorů jsou na tom nejhůře VS vlákna 20-25%. Lepší výtěžnost mají prekurzory z PAN vláken, a to kolem 45–50%. Největší výtěžnost je z prekurzorů ze smol, dosahuje až 75–80%, navíc lze připravit vysoce orientované struktury.

VS se pro výrobu uhlíkových vláken dnes téměř nepoužívá kvůli velké ztrátě hmoty při přeměně za vysokých teplot. Nejčastěji se pro výrobu uhlíkových vláken používají vlákna PAN a nově vlákna fenol-aldehydová. Pro výrobu nejtužších uhlíkových vláken se používá smol (zbytků po destilaci černého uhlí a ropy), které dosahují modulu pružnosti v tahu E až 965 GPa (při grafritizaci se používá dloužení), tyto vlákna mají jinou mikrotexturu než vlákna z PAN – mají větší uspořádanost struktury a vyšší anizotropii vlastností. Vlákna z PAN nedosahují větších modulů pružnosti, přesto však mají modul pružnosti E větší než ocel. [7]

1.3 POSTUP VÝROBY

1. Příprava prekurzoru – úprava výchozího materiálu tavným zvláknováním nebo zvláknováním z roztoku. Zvláknuje se pod napětím, aby se vytvořila orientace molekul ve směru osy vlákna. Čím je tato orientace dokonalejší, tím má vlákno vyšší modul pružnosti a pevnost. Vlákno je následně dlouženo na požadovanou jemnost. V dalších fázích dochází k převodu vlákna na vlákno uhlíkové.

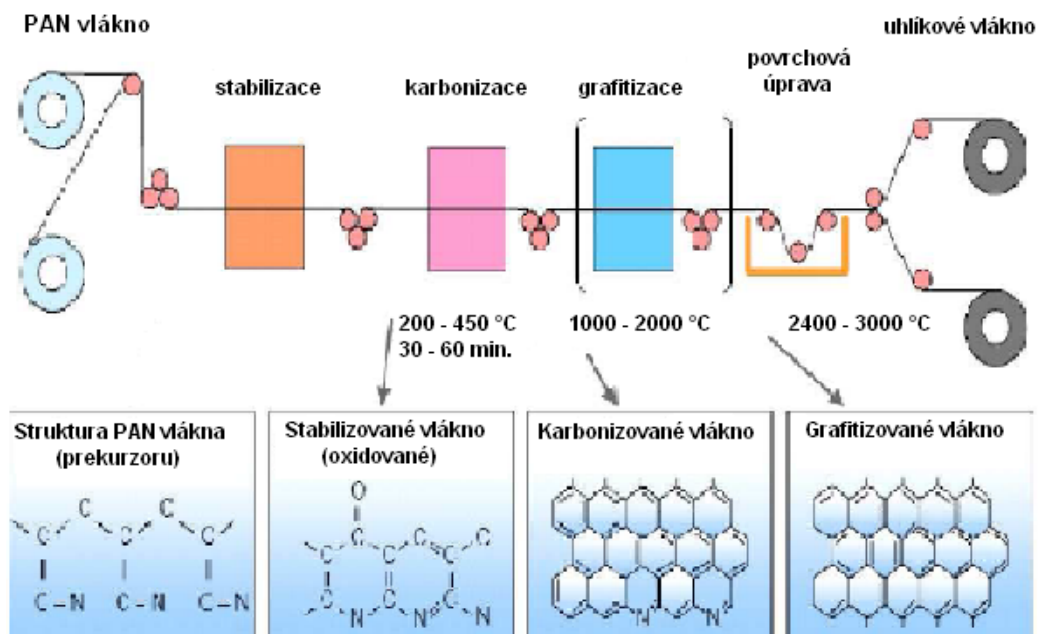
2. Stabilizace – před karbonizací je třeba, aby z dlouhých uhlíkových vláken vznikla teplotně stabilní zesíťená struktura. Provádí se na vzduchu, zahřátím na poměrně nízké

teploty 200°C - 450°C po dobu 20 - 30 minut, tím dochází k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Stabilizace vede ke zčernání vlákna a jeho netavitelnosti.

3. Karbonizace – jedná se o převod prekurzoru na uhlíková vlákna. Provádí se v inertní dusíkové atmosféře při teplotách mezi 1000°C – 2000°C. Bez přístupu kyslíku vlákno nemůže hořet. Místo toho způsobí vysoká teplota rozkmitání atomů ve vlákne tak, že většina neuhlíkových atomů je odstraněna (odstraní se vodík a sníží obsah dusíku a kyslíku). Výsledné vlákno obsahuje 85-95 % uhlíku. Vlákno dosáhne maximální pevnosti v tahu.

4. Grafítizace – nemusí se provádět. Pokud je provedena, vznikají tzv. grafítová vlákna. Provádí se v inertní atmosféře, při teplotách mezi 1800°C - 3000°C. Dochází ke zvýšení obsahu uhlíku ve vlákne až na 99% a více, to vede k zvětšení tuhosti vlákna. U standardních vláken z PAN (viz Obr. 1) je přírůstek tuhosti dosažen za cenu poklesu pevnosti, protože zvětšení velikosti mikrokystalů vede též k zvětšování defektů mezi nimi. Vzniká uspořádaná vrstevnatá grafická struktura.

5. Povrchová úprava – povrchová úprava je potřebná z důvodu odstranění látek bránící v kontaktu s matricí, kvůli omezení další adsorpce plynů na povrch vlákna a pro zvýšení reaktivity povrchu vůči vazebným prostředkům a matricím. Proto se povrch vlákna mírně oxiduje. Přidání kyslíkových atomů na povrch umožňuje lepší přilnavost dalších látek a zhrubnutí povrchu pro lepší mechanické spojení s těmito látkami. Okysličení může být dosaženo přístupem plynů, jako je vzduch, oxid uhličitý, nebo ozon nebo ponořením do kapalin jako je chlornan sodný nebo kyselina dusičná. Vlákno může být také pokryto ochrannou vrstvou proti poškození při dalším zpracování, tzn. ochrana před povrchovou abrazí, protože uhlíková vlákna jsou křehčí než skleněná vlákna. Při použití úpravy se občas pozoruje zlepšení tahové pevnosti, což je vysvětlováno zahojením povrchových defektů.



Obr. 1 - Schéma výroby uhlíkových vláken z PAN prekurzoru a znázornění změny struktury PAN vlákna [6]

1.4 VÝROBNÍ SORTIMENT UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

- standardní karbonizovaná vlákna
 - s průměrnou pevností (**AS** – „Average Strength“)
 - s vysokou pevností (**HS** – „High Strength“)
 - s vysokým modulem pružnosti (**HT** či **HTA** – „High Tenacity“)
- grafitizovaná vlákna s vysokým modulem pružnosti (**HM** – „High Modulus“)
- vlákna vysoce pevná, se středním modulem (**IM** – „Intermediate Modulus“)
- vlákna s extrémně vysokým modulem pružnosti (**SHM** – „Super High Modulus“, **VHM** – „Very High Modulus“, **UHM** – „Ultra High Modulus“)
- diskontinuální vlákna porušená tahem (**SBCF**, „Stretch-Broken Carbon Fiber“)
- dutá uhlíková vlákna
- mletá uhlíková vlákna
- recyklovaná uhlíková vlákna [7]

1.5 VLASTNOSTI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Uhlíková vlákna lze rozlišovat podle hodnot Youngova modulu pružnosti E [Pa], pevnosti v tahu R_m [GPa] a tažnosti A [%]. Tyto veličiny jsou různé při různých výrobních technologiích a dle použitých výchozích surovin. Např. vlákna získaná při 900°C až 1500°C jsou pevnější, nazývají se standardní karbonizovaná vlákna s vysokou pevností (HS). Další karbonizací HS vláken při teplotě 2000°C až 2800°C se získají

vlákna grafitová, která mají menší tahovou pevnost, ale vynikají vyšším modulem pružnosti v tahu (HM). Vlákna HS jsou levnější než vlákna HM. Ideální grafitická struktura má modul přes 1000 GPa. [2]

Tab. 1 – Vlastnosti uhlíkových vláken

<i>Mechanické vlastnosti</i>	<i>Chemické vlastnosti</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Vysoká pevnost v tahu • Vysoký modul pružnosti v tahu • Odolnost proti únavě • Útlum vibrací • Nízká měrná hmotnost • Nízký koeficient tření • Nulová plastická deformace při namáhání 	<ul style="list-style-type: none"> • Odolnost vůči kyselinám, zásadám a rozpouštědlům • Nehořlavost • Chemická inertnost • Biologická snášenlivost
<i>Tepelné vlastnosti</i>	<i>Elektrické a elektromagnetické vlastnosti</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Nízký koeficient tepelné roztažnosti • Odolnost tepelným rázům • Široké rozpětí koef. tepelné vodivosti • Odolnost vysokým a nízkým teplotám 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrická vodivost • Vysoká propustnost RTG záření • Nemagnetičnost • Nepropustnost elektromagnetického záření

Uhlíková vlákna se vyznačují těmito zvláštnostmi:

- Anizotropií mechanických vlastností - ve směru kolmém k ose vlákna mají vlákna modul pružnosti výrazně menší, na úrovni hodnot polykrystalického grafitu.
- Křehkostí - prodloužení při přetržení (tažnost) je menší než u skleněných vláken, minimální poloměr při ohýbání je proto větší než u skleněných vláken.
- Záporným koeficient délkové teplotní roztažnosti, tj. při ohřevu se vlákno zkracuje. Ve směru kolmém má kladnou hodnotu a je větší než u vláken skleněných.
- V podélném směru mají uhlíková vlákna malý elektrický odpor (jen $1,9 \cdot 10^{-6}$ W/m u nejtužších vláken). [7]

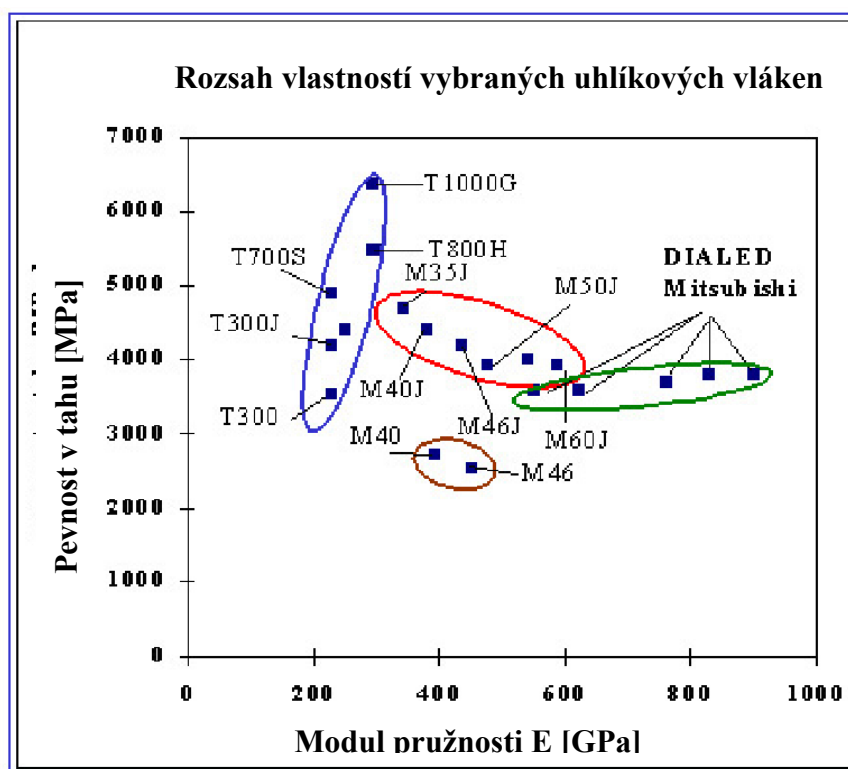
V následujících tabulkách (Tab.2 - 3, Obr.2) lze sledovat různé vlastnosti vláken z PAN při použití různých teplot zpracování dle toho, jak uvádí výrobce Toray Industries, Inc.

Tab. 2 - Vysokomodulová uhlíková PAN vlákna [7]

Uhlíkové vlákno	M35J	M40	M46J	M50J	M55J
Modul pružnosti E [GPa]	344	393	434	475	538
Pevnost v tahu [GPa]	4,71	2,744	4,214	4,117	4,02

Tab. 3 - Vlastnosti uhlíkových vláken z PAN při teplotě 20°C [7]

Uhlíkové vlákno		T300	M40J	T800H	T1000G	M60J
Průměr [μm]		7 - 8	7	5 - 6	5	4
Hustota [g/m^3]		1,76	1,77	1,81	1,8	1,92
Modul pružnosti E [GPa]	Osový	230	377	294	294	588
	Příčný	--	40	21	--	--
Pevnost v tahu [GPa]		3,53	4,41	5,49	5,3 – 6,8	4,21
Tažnost [%]		1,5	1,2	1,9	2,0 – 2,5	0,7
Součinitel délkové tepelné roztažnosti [$10^{-6} 1/\text{K}$]	Osový	-0,7	-0,5	--	--	--
	Příčný	10	7	--	--	--
Tepelná vodivost [W/mK]		8,5	70	7	--	--
Obsah uhlíku [% hmotnostní]		92 - 97	99	92 - 97	96	96



Obr. 2 - Rozsah mechanických vlastností vláken z polymerních prekurzorů [3]

Vysvětlivky k obrázku:

- **T300, T300J, T700**

Karbonizovaná vlákna se středním modulem pružnosti a dobrou pevností v tahu, standardní uhlíková vlákna (HS, AS)

- **M40J, M46J, M35J, M50J, M40, M46**

Vysokomodulová grafitizovaná vlákna (HM)

- **T800H, T1000G**

Vlákna vysoce pevná se středním modulem pružnosti (IM)

- **DIALED**

Vlákna s velmi vysokým modulem pružnosti (VHM)

Z předchozích tabulek a z tabulek umístěných v příloze č. 1, lze odvodit rozmezí hodnot pro dané vlastnosti dle druhu uhlíkových vláken (viz. Tab. 4).

Tab. 4 - Rozmezí hodnot mechanických vlastností uhlíkových vláken [7]

	Pevnost v tahu R_m [GPa]	Tažnost A [%]	Modul pružnosti E [GPa]
HM smoly	1,3 – 3,3	0,2 – 1,3	140 - 910
HM PAN	1,9 – 4,2	0,4 – 0,7	350 - 540
HS PAN	3 – 7	1,7 – 2,4	235 - 400
HT	3 - 4	--	230 - 300
IM PAN	3,5 – 4,5	1,3 – 1,6	290 - 390
UHM	2,5 - 4	--	550

Cena uhlíkových vláken je závislá na jejich parametrech a počtu monofilů v kabílcích. Nejlevnější jsou standardní typy vláken, které lze koupit za cenu pod 20\$/kg (kabílek s 12000 paralelními monofily). Špičková vlákna, např. UHM lze pořídit za cenu 800\$/kg (kabílký s 2000monofily).

2. KOMPOZITY

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek neboli fází, které jsou od sebe rozlišitelné a oddělené rozhraním. Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, má obvykle výrazně vyšší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost, atp.) a jejím hlavním cílem při vyztužení je zlepšení těchto uvedených vlastností. Spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice, její hlavní funkce je udržet vlákna ve správných pozicích, pomáhat distribuovat napětí, chránit vlákna před poškozením abrazí a kontrolovat elektrické a chemické vlastnosti. Složky musí navzájem spolupracovat, tj. alespoň jedna vlastnost kompozitu musí být lepší (vyšší), než je pouhý průměr vlastností jednotlivých složek - *Synergický efekt*.

Matrice může být:

- Polymerní
- Kovová
- Keramická
- Skleněná
- Sklokeramická
- Uhlíková

Výztužující vlákna mohou být:

- Skleněná
- Uhlíková
- Bórová
- Polymerní
- Keramická (SiC , Al_2O_3 , Si_3N_4)
- Přírodní (rostlinná, čedičová a azbestová)
- Proteinová (vlákna pavouků)
- Piezoelektrická

Kompozity lze dělit několika způsoby, níže uvedeny jen některé [3]:

Podle velikosti výztuže

- *Makrokompozity* - výztuž o velikosti příčného rozměru v mm až cm
- *Mikrokompozity* – největší příčné rozměry vláken nebo částic v μm
- *Nanokompozity* – délka částic nebo průměr vláken v nm

Podle druhu vláknenného produktu

- *Rozptýlená vlákna*
- *Sekané prameny*
- *Mletá vlákna*
- *Rovingy* (pramence, kabílky) – sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů; pro výrobu profilů tažením (pultruzí), pro navíjení a pro výrobu jednosměrných prepregů

- *Rovingové tkaniny* – jsou určeny pro kontaktní laminování, pultruzi, navíjení a výrobu tkaninových prepregů
- *Rohože* – ze sekaných vláken (25-50mm) spojených polymerními pojivy, z kontinuálních vláken vzájemně propletených nebo rovno z nahodile uspořádaných kontinuálních či delších sekaných vláken
- *Prepregy* – různě široké role s uspořádanými rovingy, tkaninou nebo rohoží; pro přípravu špičkových polymerních kompozitů, výztuž je předimpregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi

Podle geometrického tvaru výztuže

- *Disperzní*
- *Částicová* – částice pravidelných nebo nepravidelných tvarů
- *Vláknová* – jednovrstvá nebo vícevrstvá výztuž, dlouhá nebo krátká vlákna, uspořádaná nebo nahodilá

2.1 KOMPOZITY S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY

Uhlíková vlákna se používají výhradně pro technické účely a naprostá většina z nich se uplatňuje jako výztuž kompozitů. Vzhledem k vysokému modulu uhlíkových vláken, pevnosti, relativně nízké váze a vysoké ceně, se uhlíková vlákna používají na špičkové aplikace, převážně v kombinaci s reaktoplastickými epoxidovými pryskyřicemi.

Reaktoplasty (používán i název termosety) jsou tvořeny relativně malými molekulami, které jsou vytvrzeny chemickou reakcí – zesíťovány – vlivem tepla a tlaku. Tento fakt způsobuje, že vytvrzený reaktoplast zůstává v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jeho odolnost proti vysokým teplotám, i když to na druhé straně zvyšuje i jeho křehkost a omezuje recyklovatelnost.

Podíl výztuže obnáší minimálně 5% a maximálně 80 % váhy kompozitu. Uhlík se přidává ve formě mletých vláken, sekaných pramenů, filamentů, rovingů, rohoží, tkanin, pletenin, splétaných textilií, prepregů, kdy toto volíme podle funkce, jakou má složka v kompozitu splňovat. Technologie výroby kompozitních výrobků z uhlíkových vláken a pojiv je velmi široká.

Letectví a kosmonautika byly první, kdo dal impuls k vývoji těchto materiálů. Kompozity z uhlíkových vláken jsou použity při konstrukci satelitů, vesmírných lodí, jako konstrukční prvky draků letadel, výztuhy, pohyblivé části, palubní mechanismy,

potahy, sedačky, trysky raket, lopatky motorů, vrtule, tlakové nádoby na palivo, radarová technika a další.

V těchto speciálních aplikacích se používají vlákna s vysokými mechanickými parametry, kdy pevnost v tahu je 3,5 – 7 GPa a modul pružnosti 230 – 930 GPa. Jak výchozí surovina pro výrobu uhlíkového vlákna je použit polyakrilonitril, mezofázové smoly nebo whiskery připravené kanalytickým rozkladem plynných uhlovodíků.[7], [35]

POŽADAVKY

Důležité vlastnosti, které musí kompozity splňovat pro použití pro speciální aplikace:

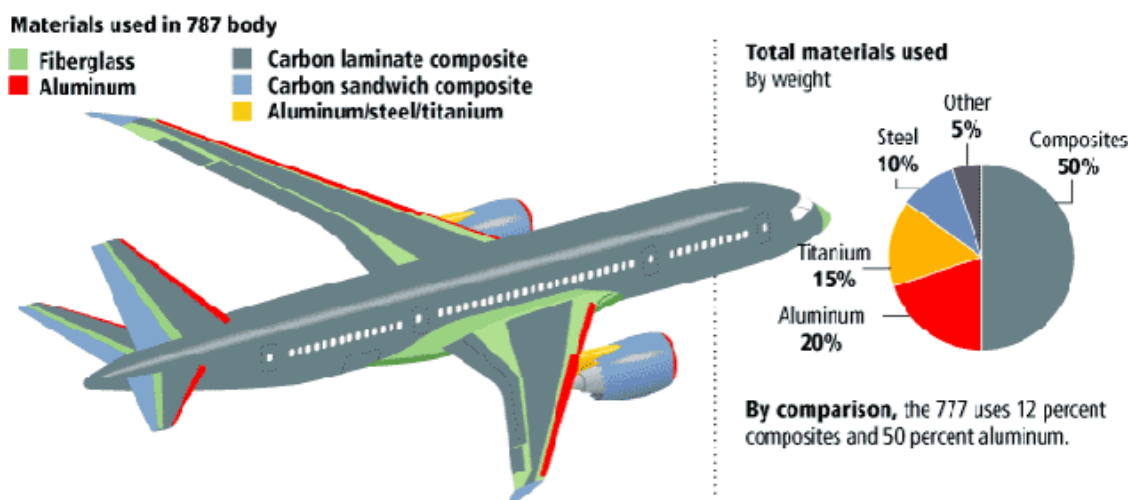
- Vysoká únavová odolnost - vlastnost potřebná u kompozitních dílů primárních leteckých konstrukcí (tj. ocasní plochy, křídla, trup) je dosažena pouze s tuhými a vysoce pevnými uhlíkovými vlákny.
- Minimální hmotnost mechanicky namáhaného výrobku - vlastnost je důležitá nejen v leteckém průmyslu, lze ji dosáhnout vyztužením uhlíkovými vlákny s nejvyššími hodnotami měrného modulu pružnosti a měrné pevnosti.
- Korozní odolnost - největší korozní odolnost mají uhlíková a polymerní vlákna.
- Zdravotní nezávadnost prostředí – tuto vlastnost uhlíková vlákna splňují, jsou křehká a jejich úlomky se sice uvolňují do ovzduší, ale nemají karcinogenní účinek v tkáni plic. Uhlíková vlákna jsou používána jako náhrada azbestu pro třecí elementy brzd (disky brzd letadel, brzdové destičky automobilů).
- Nulová teplotní roztažnost - vlastnosti lze dosáhnout při vhodném podílu a orientaci uhlíkových vláken v kompozitu. Kompozit v širokém rozsahu teplot má téměř nulovou teplotní roztažnost. Vlákná mají záporný součinitel teplotní roztažnosti v podélném směru a kladný ve směru kolmém k ose vlákná.
- Vysoká tepelná vodivost – tuto vlastnost mají vysoce tuhá (UHM) uhlíková vlákna z mezofázových smol a krátká uhlíková nanovlákná vyráběná technikou CVD v parách uhlovodíků (VGCF). Součinitel tepelné vodivosti ve směru podélné osy UHM je 950 W/mK, VGCF až 1950 W/mK.
- Stínění elektromagnetického záření – elektricky vodivá uhlíková vlákna jsou používána pro stínění. Pro lepší stínění se vyrábějí krátká uhlíková vlákna s povrchovou vrstvou niklu. [7], [34]

2.2 APLIKACE UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ V LETECTVÍ [1]

Procento kompozitních materiálů v primárních konstrukcích letadel neustále roste. Rychlý nárůst těchto aplikací na trupech, křídlech a dalších částech lze ilustrovat na jejich podílu u předposlední a poslední generace dopravních letadel A380 a Boeing 787. Důvodem jsou vynikající specifické mechanické vlastnosti kompozitních materiálů přinášející významná snížení hmotnosti a s tím související snížení spotřeby paliva a redukci emisí. Nahrazení kovů kompozity představuje obrovský objem vývojových aktivit pro realizaci cenově přístupných, lehkých, tuhých, pevných konstrukcí s přípustným poškozením. S tímto růstem přichází požadavek na soustavné zdokonalování výrobních technologií.

- **BOEING 777**

Boeing 777 je dopravní letadlo vyrobené společností Boeing Commercial Airplanes (viz. Obr. 3). Je schopné přepravit 305-550 pasažérů v závislosti od verze na vzdálenost 10 370 – 17 445 km. [8]

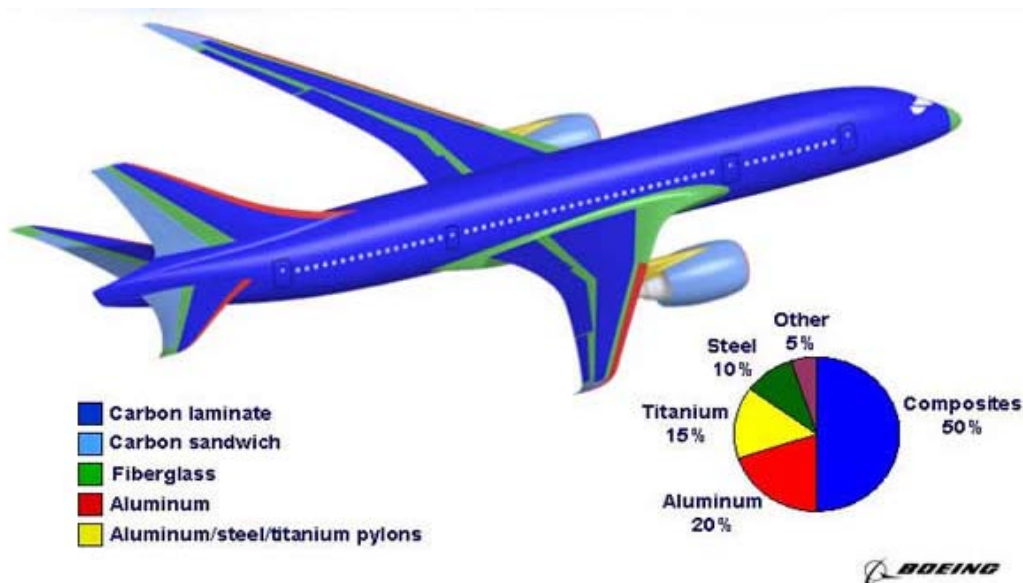


Obr. 3 - Dopravní letadlo Boeing 777 – použití materiálů [9]

- **BOEING 787 DREAMLINER**

Boeing 787 Dreamliner (viz. Obr. 4) je poslední model dopravního letounu využívající mnoha technických vylepšení oproti starším modelům (např. použití uhlíkových vláken). Dreamliner má nahradit stávající modely Boeing 757 a Boeing 767. Model 787 je v současnosti nabízen ve dvou variantách s kapacitou 210–330 míst a bude určen na střední a dlouhé tratě. [24]

Boeing 787 je z 50 % (hmotnostní procenta) vyrobeno z kompozitních materiálů.

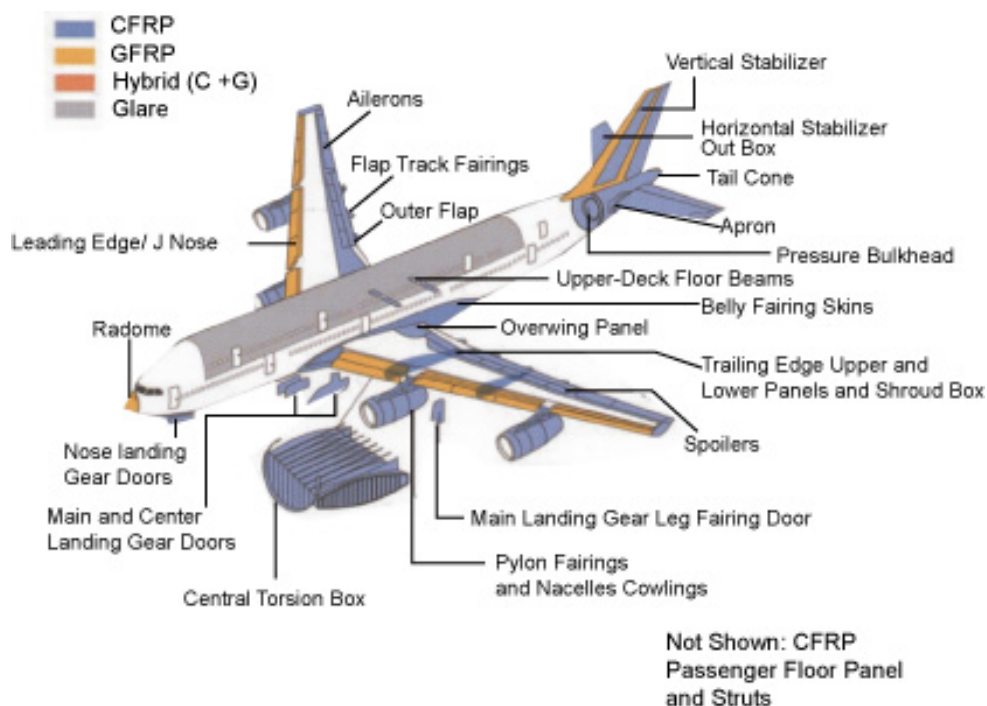


Obr. 4 - Boeing 787 Dreamliner – materiálové složení [10]

- **AIRBUS 380**

Airbus A380, vyráběný společností Airbus S.A.S. (viz. Obr. 5), je největší současné osobní dopravní letadlo světa s kapacitou 480 – 853 pasažérů v závislosti na verzi s doletem 15 400km.

Airbus A380 obsahuje 28 % (hmotnostních) kompozitů s uhlíkovými vlákny (CFRP). [25]



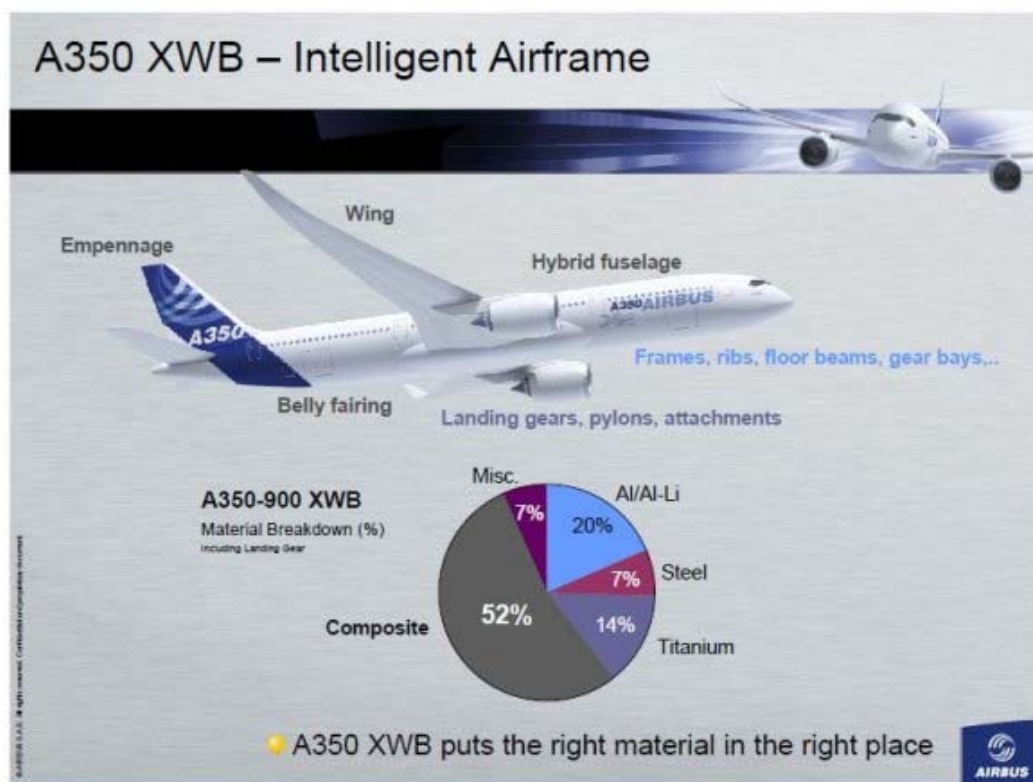
Obr. 5 - Airbus 380 – materiálové složení [11]

- **AIRBUS A350 XWB**

Airbus A350 XWB (“Xtra Wide Body“) pro 270 až 550 pasažerů dle typu, by mělo být uvedeno do provozu v roce 2013.

Letadlo bude z 52 % hmotnostních vyrobeno z kompozitů (viz. Obr. 6).

Prepregy pro potah trupu se středně modulovými, vysoce pevnými uhlíkovými vlákny (IM vlákna) v houževnaté epoxidové pryskyřici bude dodávat společnost Hexcel. [25]



Obr. 6 - Airbus A350 XWB – materiálové rozložení [12]

3. RECYKLACE UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ

Recyklace uhlíkových vláken, resp. recyklace kompozitů s uhlíkovými vlákny je v současnosti nový celosvětový problém, který řeší přední evropské, americké i japonské laboratoře. Pro letecký průmysl z širokého sortimentu typů kompozitů jsou nejobvyklejší materiály s vláknovou výztuží a reaktoplastickou maticí.

Objem výroby uhlíkových vláken se stále zvyšuje. Vysoká cena (mnohonásobně vyšší než cena skleněných vláken) způsobena náročnou výrobou vláken a vynikající mechanické vlastnosti naznačují, že uhlíková vlákna se vyplatí recyklovat, nikoliv likvidovat skládkováním nebo spalováním. Cena recyklovaného vlákna by neměla přesáhnout 50 % ekvivalentu z prvovýroby.

3.1 ZPŮSOBY RECYKLACE

I když problematika recyklace prošla vývojem, recyklace kompozitních materiálů s reaktoplastickou maticí je obtížným, dosud nevyřešeným úkolem z technického i ekonomického hlediska v porovnání se situací materiálů termoplastického charakteru.

- **MATERIÁLOVÁ RECYKLACE**

Materiálovou recyklaci kompozitního materiálu lze provádět mletím a drcením.

Výhodou materiálové recyklace je možnost využití až 100% odpadu s malou nebo nulovou ztrátou. Tvrdé textilní odpady, které nelze zpracovat na spřadatelná nebo rounotvorná vlákna, se mohou použít jako plnivo ve stavebnictví do nekonstrukčních směsí.

Nevýhodou však je zhoršení vlastností recyklovaného výrobku, např. zkrácení vláken nebo degradace polymeru.

- **SUROVINOVÁ RECYKLACE**

Z termických postupů recyklace lze pro kompozity využít pyrolýzu – pyrolýzně oxidační rozklad – na kompozity s reaktoplastickou i termoplastickou maticí. Tento postup, zatím pouze laboratorně, byl vyvinut a otestován v laboratořích VZLÚ a má velký potenciál využití v budoucnosti. Jiné alternativy, jako třeba chemický rozklad hydrolýzou jsou sice technicky možné, ale naprosto neekonomické.

Výhodou surovinové recyklace při termickém zpracování je vysoká výhřevnost polymerních materiálů, možnost zpracovávat i směsové materiály a to, že nezáleží na tvaru a velikosti odpadu.

Nevýhodou termické recyklace je náročné odlučování spalin a pevného odpadu, což vyžaduje vyšší náklady a zároveň zde hrozí nebezpečí havárie. [13], [29]

3.1.1 PYROLÝZNÍ PROCES DEKOMPOZICE

Základní myšlenkou recyklace kompozitů je oddělení vláknové výztuže od polymerní matrice.

Problematikou recyklování kompozitů s reaktoplastickou matricí se zabývá VZLÚ a.s. již od roku 2005. Technické řešení, které na základě širokých rozborů a studií bylo vybráno pro další vývoj a ověřování je založeno na pyrolýze, tedy teplotním zpracováním kompozitního odpadu, v jehož důsledku vznikají produkty (recykláty) s významnými předpoklady pro jejich další následné využití, a to za relativně nízké degradace užitně-technických vlastností původního materiálu.

Pro toto řešení bylo sestaveno experimentální zařízení tak, aby provádělo tepelný rozklad materiálů v inertním i oxidačním prostředí a současně, aby dokázalo monitorovat proces tepelného rozkladu (viz. Obr. 7). S ohledem na skutečnost, že tato technologie zpracování kompozitů není běžně prováděna, nejsou známy ani vhodné technologické podmínky zpracování pro jednotlivé typy kompozitních materiálů. Také zařízení, na kterém by bylo možno příslušné experimenty provádět, není v současné době průmyslově vyráběno. [14]



Obr. 7 - Experimentální systém pro teplotní (pyrolýzní) rozklad vláknových termosetických kompozitních materiálů [14]

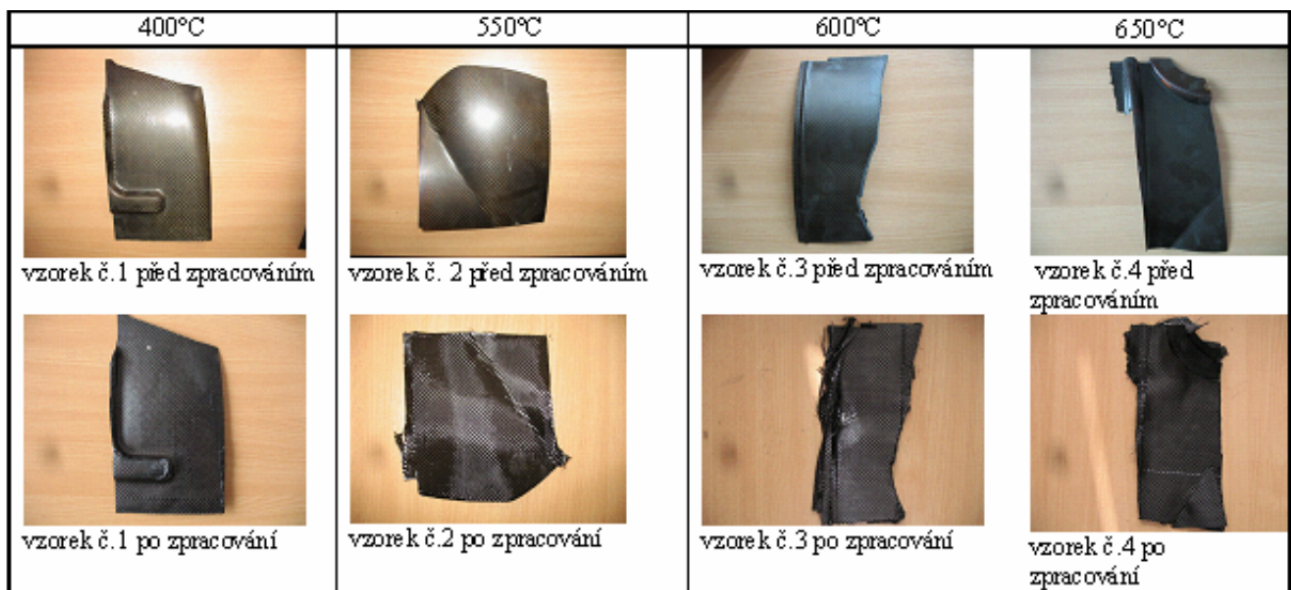
Základem systému je pyrolýzní (teplotní) reaktor, kde za standardní či inertní atmosféry (N_2 , Ar) dochází ke zpracování dávkově vsazovaného materiálu. Pyrolýzním zpracováním je v tomto případě míněno zpracování za sníženého přístupu vzdušného kyslíku. Reaktor i celé zařízení má mírně podtlakový charakter, kdy produkty zplynování matrice jsou odsávány a vedeny do chladiče. Zde, v závislosti na typu kompozitu a použité technologii, může dojít ke kondenzaci zkapalnitelných složek. Z chladiče jsou zbylé plynné produkty vedeny do filtru, který minimalizuje jejich působení a umožňuje zachytávat některé další složky rozkladu. Vyseparovaná vlákna výztuže, případně další pevné produkty rozkladu, zůstávají v reaktoru a jsou vyjmuty až po ukončení celé technologie zpracování. [14]

První výsledky ukázaly, že touto cestou lze získat skelnou, bórovou i uhlíkovou výztuž. Aramidovou výztuž se získat nepodařilo, aramidová tkanina neodolá vysokým teplotám potřebným pro rozklad polymerní matrice. Kevlarová výztuž také nevydrží teplotu dekompozice, nutnou ke zplynování matrice a degraduje do takové míry, že už je dále nepoužitelná. Ukázalo se rovněž, že skleněná vlákna po tepelném rozkladu kompozitu výrazně ztratila na svých vlastnostech, takže jako recyklát se zpevňující funkcí ho už nelze použít. Bórová vlákna lze bez větších problémů z kompozitních materiálů získat recyklací a dále zpracovávat, avšak bórová výztuž kompozitů se v ČR až na malé výjimky prakticky nevyskytuje. [15]

Výsledky rovněž ukázaly, že pyrolýzní rozklad (v inertní atmosféře dusíku) produkuje vlákna znečištěná zuhelnatělou polymerní matricí, kdežto oxidační rozklad produkuje čistá vlákna jen s nepatrnými zbytky popela. Použití dusíku rovněž zhoršuje ekonomiku procesu. [15]

Vývoj nakonec vyústil v zaměření na recyklaci materiálů vyztužených cennými uhlíkovými vlákny cestou termooxidačního rozkladu. [15]

V současné době jsou již odzkoušeny recyklace materiálůvé kombinace uhlík-epoxid a uhlík-bismaleimid. U každého odzkoušeného materiálu byl proveden návrh a optimalizace postupu zpracování, která zahrnuje: teplotu zpracování T_z , nutnou dobu výdrže na teplotě T_z v závislosti na tloušťce materiálu, průběh teploty rozkladu, vliv velikosti a tvaru zpracovávaného dílu a umístění materiálu v zařízení (viz. Obr. 8).



Obr. 8 - Vzorčky kompozitů vypálené při různých teplotách [15]

Experimentálně ověřené postupy [15] :

- **Teplotní křivka a teplota zpracování T_z**

Pro kompozit typu uhlík-epoxid byla teoreticky a následně experimentálně zjištěna teplota zpracování $T_z = 550^\circ \text{C}$, průběh teplotní křivky byl postupně experimentálně optimalizován, podle charakteru zpracovávaného kompozitního dílu (konkrétní typ pryskyřice, procento výztuže, způsob výroby).

Pro materiál uhlík-bismaleimid (BMI pryskyřice se mohou používat i při teplotách 232°C , začínají se rozkládat okolo 400°C) byla určena teplota zpracování rovněž $T_z = 550^\circ \text{C}$, postupnou optimalizací byl zjištěn optimální teplotní režim zpracování.

Bylo zjištěno, že teplota 550°C dává nejlepší vlastnosti recyklované výztuže z hlediska degradace povrchu vláken, materiálových úbytků a mechanických vlastností při současném dokonalém zplynování matrice.

- **Doba výdrže na teplotě T_z**

Doba výdrže na teplotě je funkcí tloušťky materiálu, závisí na ní, jak dokonale se materiál rozloží a jak znečištěná zůstane výztuž. Pro každý konkrétní testovaný materiál se musí závislost doby výdrže na tloušťce materiálu zjistit experimentálně.

3.1.2 DEKOMPOZICE KOMPOZITU UHLÍK-EPOXID [14]

Jako příklad lze uvést obecný postup pro zpracování dílu s typickou materiálovou skladbou používanou v leteckém průmyslu. Použitý díl reprezentuje aplikaci kompozitního křídla letounu. Pro experimenty byl použit kompozitní díl typu uhlík-epoxid (viz. Obr. 9 a 10), tvaru desky o tloušťce max. 5 mm, výroba autoklávovou technologií z jednosměrného prepregu, s expozicí umožňující proudění média po obou stranách, a to z hlediska jednoho vybraného technologického parametru procesu zpracování – teploty.

Typický proces dekompozice se realizuje ve čtyřech základních krocích:

krok 1 – rychlý nárůst teploty na $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 45 min.

krok 2 – nárůst teploty na teplotu zpracování $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 120 min.

krok 3 – výdrž na teplotě $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 15 minut

krok 4 – rychlý pokles teploty až na hodnoty standardního prostředí

Řízený průběh teploty a doba prodlevy na konkrétní teplotě jsou rozhodující parametry pro tepelný rozklad polymerních matic.



Obr. 9 - Vzorek kompozitu uhlík-epoxid před a po teplotním rozkladu [14]



Obr. 10 - Vzorek kompozitové desky uhlík-epoxid před zpracováním (dole) a vyseparovaná vláknová výztuž po zpracování (nahore) [14]



Obr. 11 - Vlákno­vá výztuž po recyklaci [14]

Z výsledků zkoušek pyrolýzně-teplotního rozkladu kompozitního dílu (uhlík-expoxid, výroba autoklávovou technologií z jednosměrného prepregu), je patrný vysoký stupeň čistoty vyseparovaných vláken původní kompozitové výztuže (viz. Obr. 11).

Forma vyseparované vláknové výztuže odpovídá původnímu materiálu (polotovaru), který byl pro výrobu kompozitního dílu použit. V případě rohoží či vícesměrných tkanin lze tedy získat relativně velmi čistou rohož či tkaninu, obvykle ve formě na sobě ležících jednotlivých vrstev tak, jak byly strukturovány v kompozitu.

3.2 APLIKACE RECYKLOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Oblastí, která je v současnosti také řešena, je problematika následného využití vláknového uhlíkového recyklátu. [23]

Možnosti aplikačního využití recyklátů:

- kompozity plněné mletými uhlíkovými vlákny s termoplastickou matricí
- materiály vyráběné „papírenskou technologií“ (různé aplikace včetně opětovného uplatnění jako vláknové/tkaninové výztuže do kompozitních materiálů) – výroba uhlíkového vodivého papíru
- použití jako vláknové výztuže do termoplastických matric a následné výroby standardními technologiemi např. lisováním, vstřikováním
- použití jako vláknové výztuže do reaktoplastických matric
- vláknové výztuže v plnivech, lepidlech, nátěrech
- vláknové výztuže v asfaltu, betonu, geopolymeru
- vyztužené povlakové ochranné systémy, 3D textilie, sekundární výplňkový materiál

Poznámka: Recyklovaná vlákna jsou použitelná jako výztuž pouze pro nekonstrukční použití.

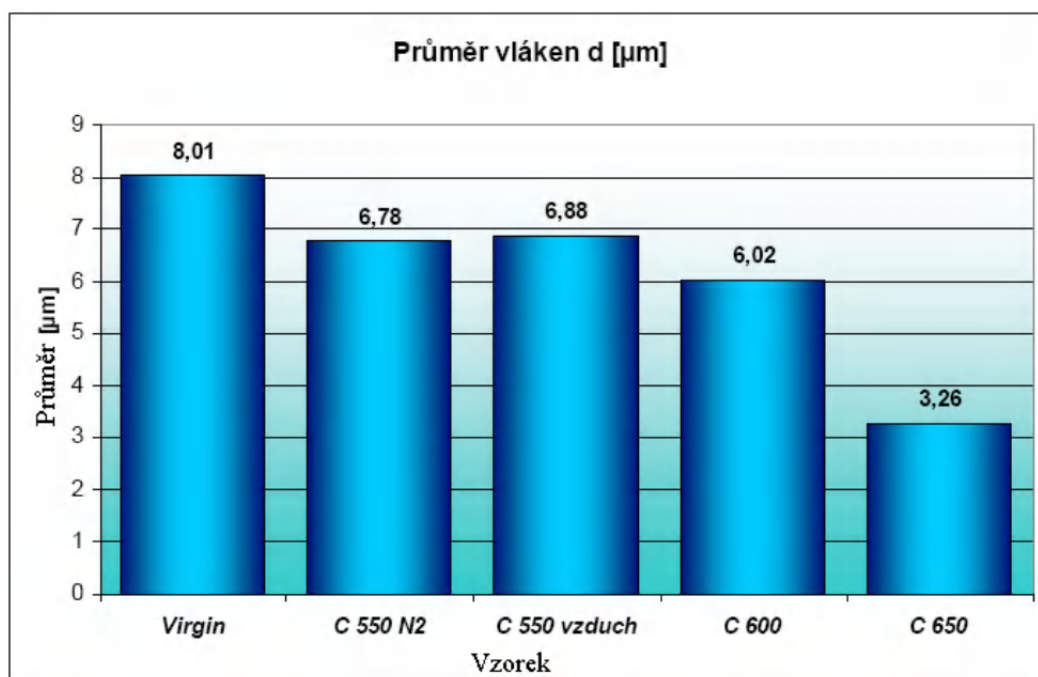
3.3 VLASTNOSTI RECYKLOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Cílem této diplomové práce není porovnávání vlastností recyklovaných uhlíkových vláken s vlastnostmi originálních vláken, proto ke srovnání byla použita zpráva zpracovaná VZLÚ v roce 2008.

VZLÚ testovalo ve spolupráci s TUL vzorky vláken, které byly získány recyklací uhlíkových kompozitů jejich tepelným rozkladem při různých teplotách, buď v oxidačním prostředí, nebo v inertní atmosféře a vlastnosti byly porovnány s originálními „VIRGIN“ vlákny. [26], [23], [30]

• PRŮMĚR VLÁKEN

Světelným mikroskopem byl vytvořen obraz preparátů podélných pohledů vláken. Princip zkoušky spočíval ve změření 500 pohledů na vlákno a zjištění šířky vlákna.

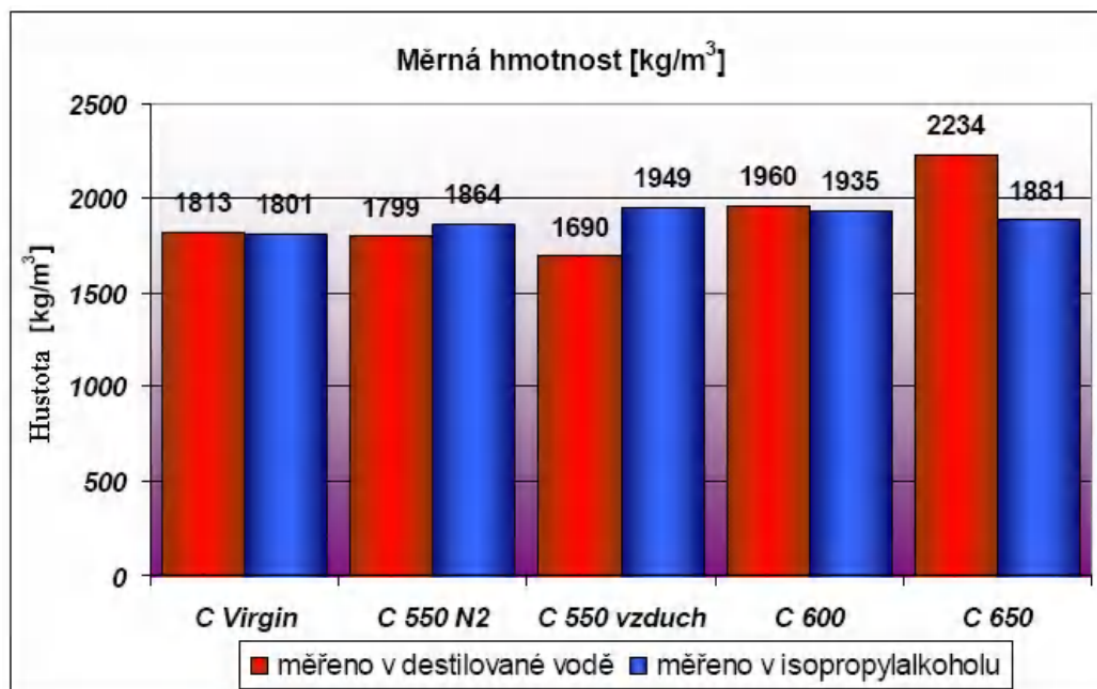


Obr. 12 – Grafické zobrazení průměrů recyklovaných uhlíkových vláken v závislosti na teplotě recyklace [26]

Průměr vláken se s rostoucí teplotou recyklace snižuje, což je způsobeno větší degradací vláken. Oproti předpokladům mají větší průměr vlákna recyklovaná při 550°C na vzduchu, než v dusíku, ale jen o nepatrnou hodnotu. Ovšem toto mohlo být způsobeno jiným průměrem vláken před recyklací (viz. Obr. 12).

- **MĚRNÁ HMOTNOST**

Byla zjišťována metodou dvojího vážení, která spočívá ve zvážení materiálu za sucha a potom namočeného ve vhodné kapalině (destilovaná voda, izopropylalkohol).

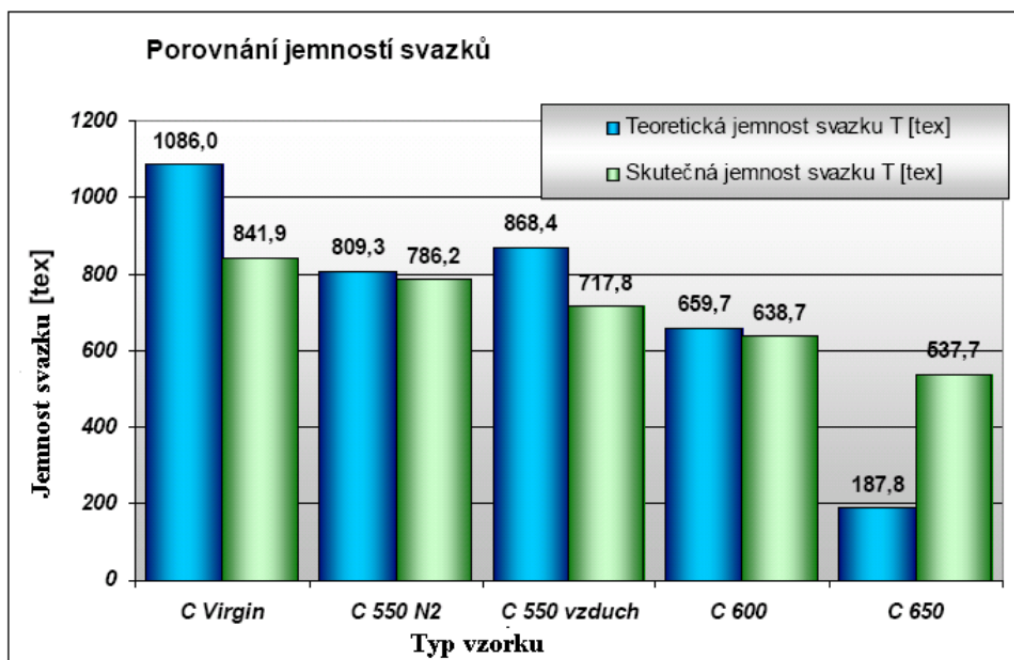


Obr. 13 – Grafické znázornění porovnání měrných hmotností naměřených na recyklovaných uhlíkových vláknech v destilované vodě a v izopropylalkoholu [26]

Při měření v destilované vodě je rozdíl měrné hmotnosti mezi vzorky Virgin a 550°C N₂ zanedbatelný, u vzorků 550°C vzduch je hustota nejnižší a u vzorků 600°C a 650°C zase stoupá. Tento jev je údajně způsoben vlastnostmi tepelné pyrolýzy, tím, že při rostoucí teplotě dochází k narušení vnitřní struktury vláken, vypálením méně krystalických částí vlákna. Při měření v izopropylalkoholu je největší měrná hmotnost u vzorků zpracovaných při 550°C na vzduchu, nejnižší je u vláken Virgin (viz. Obr. 13).

- **HMOTNOST A JEMNOST SVAZKŮ VLÁKEN**

Při zjišťování měrné hmotnosti, byly jednotlivé svazky zváženy a změřena délka, tyto hodnoty se pak využily ke spočítání jemnosti svazku T [tex]. Dále byla počítána jemnost jednoho vlákna a počet vláken ve svazku dle rovnic pro výpočet jemnosti jednoho vlákna a svazků vláken.

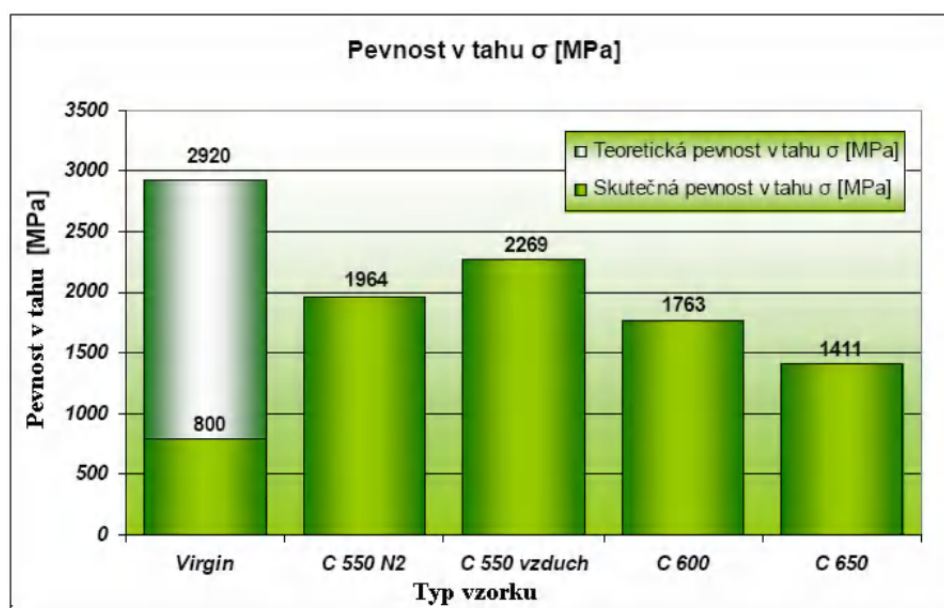


Obr. 14 – Grafické znázornění porovnání jemností svazků recyklovaných uhlíkových vláken [26]

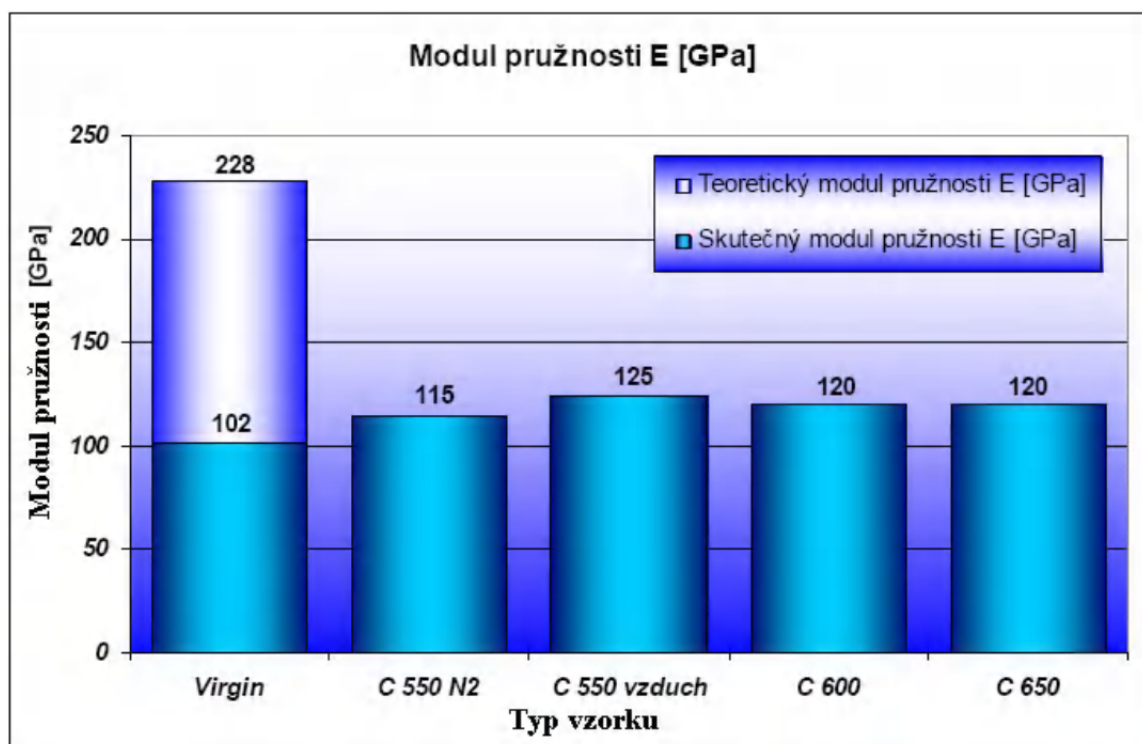
Ukazuje se, že s rostoucí teplotou recyklace se jemnost vláken snižuje. Teoretický počet vláken ve svazu je podle firmy Hexcel 12000. K tomuto číslu se přibližují vzorky 550°C N₂ a 600°C. Vzorek 550°C vzduch této hodnotě relativně odpovídá, vzorek 650°C ji mnohonásobně převyšuje, což je s nejvyšší pravděpodobností způsobeno vysokou degradací vláken (viz. Obr. 14).

• PEVNOST VLÁKEN

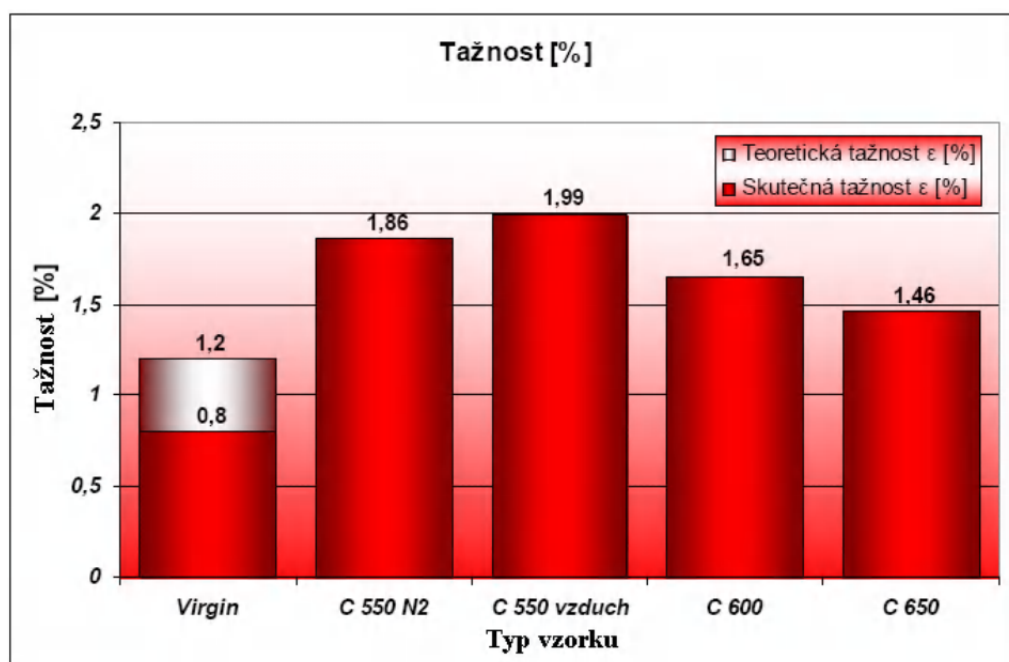
Pevnost vláken byla zkoušena na trhačím stroji TIRA test 2300 s pneumatickými čelistmi. Od každého vzorku bylo provedeno 50 měření.



Obr. 15 – Grafické znázornění pevnosti v tahu recyklovaných uhlíkových vláken [26]



Obr. 16 – Graficky znázorněné moduly pružnosti recyklovaných uhlíkových vláken [26]



Obr. 17 – Graficky znázorněné tažnosti recyklovaných uhlíkových vláken [26]

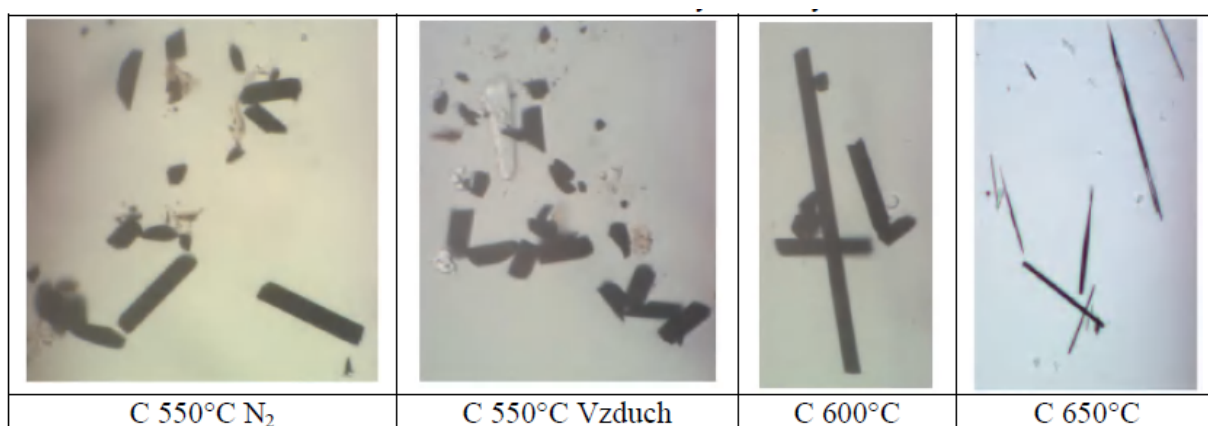
Nejvyšší hodnoty pevnosti, tažnosti a modulů pružnosti vyšly u vláken recyklovaných při 550°C na vzduchu. Teoreticky měly tyto hodnoty vyjít nejvyšší u původních nezpracovaných vláken. Uhlíková vlákna Virgin byla odebírána z tkaniny a při manipulaci pravděpodobně došlo k poškození o příčná skleněná vlákna, toto mohlo být jednou z příčin špatných výsledků. Z těchto důvodů jsou ve výše uvedených grafech

uveďeny hodnoty teoretické pevnosti, tažnosti a modulu pružnosti originálních vláken (viz. Obr. 14 a 16).

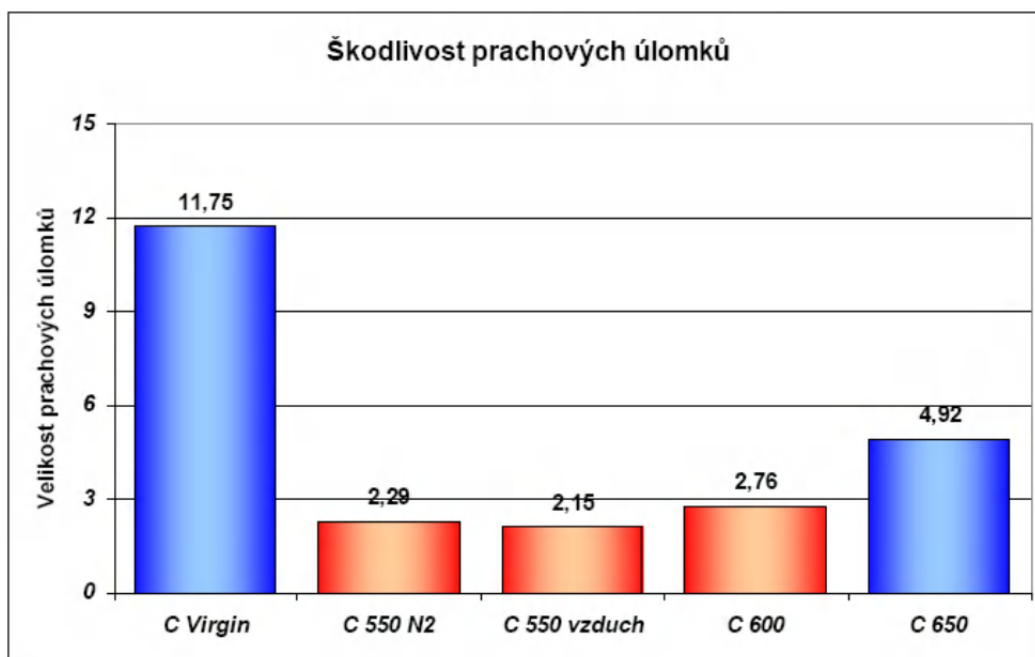
Pokles pevnosti z 2920MPa na 2269MPa u vláken recyklovaných při 550°C ve vzduchu, není až tak výrazný. Pokles modulu pružnosti z 228GPa na 125GPa už je docela značný, hodnoty tažnosti naopak vychází lépe, oproti teoretickým hodnotám (viz. Obr. 17).

• ŠKODLIVOST ÚLOMKŮ VLÁKEN

Bylo zjišťováno, jakou velikost mají úlomky recyklovaných i nerecyklovaných vláken a jak moc jsou zdraví škodlivé. Vláknová výztuž byla odírána na přístroji Martindale, po dobu cca 20 minut. Za tuto dobu došlo k prodření vláknové výztuže, z důvodu křehkosti vláken. Z vytvořených úlomků byl připraven preparát, který byl zobrazen světelným mikroskopem (viz. Obr. 18).



Obr. 18 - Prachové úlomky recyklovaných uhlíkových vláken [26]



Obr. 19 - Škodlivost prachových úlomků recyklovaných uhlíkových vláken [26]

Při zjišťování karcinogenity vyšly jako škodlivé úlomky vláken recyklovaných při 550°C v dusíku a vlákna recyklovaná při 550°C a 600°C na vzduchu. Z toho vyplývá, že při práci s recyklovanými vlákny je potřeba chránit dýchací ústrojí použitím respirátoru. Jako neškodlivá se projevila originální vlákna (viz. Obr. 19).

ZHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ RECYKLOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Recyklovaná uhlíková vlákna se dají prakticky stejným postupem, jen s menší modifikací teplotních režimů, získat z jakéhokoliv typu termosetické matrice (epoxid, BMI, fenol, atd.). Vlastnosti recyklovaných vláken se sice tepelným procesem zhorší, ale většinou ne nijak výrazně. Při teplotě zpracování 550°C, která je optimální, dojde ke snížení průměru vláken o 14,2%, pevnost v tahu se sníží o 22,3%, tažnost se naopak zvýší o 65,8%. K největšímu poklesu dojde u modulu pružnosti, který klesne o 45,18%. Vlákna recyklovaná při 550°C v N₂, při 550°C na vzduchu a při 600°C sebou nesou při ořezu určité riziko karcinogenity.

4. NETKANÉ TEXTILIE [16]

4.1 DEFINICE NETKANÝCH TEXTILIÍ DLE NORMY

Norma stanoví definici netkaných textilií takto [17]:

Netkaná textilie (NT): plošný tvar, rouno nebo pavučina, vyrobený ze směrově nebo náhodně orientovaných vláken, vázaných třením a) nebo kohezí a) nebo adhezí. Mezi netkané textilie nepatří papír a výrobky tkané, pletené, všívané, proplétané, obsahující vazné příze nebo nitě z nekonečných vláken, nebo výrobky plstěné valchováním za mokra, případně dodatečně vpichované. Poznámka: Vpichování (mechanické provázání vláken speciálně tvarovanými jehlami nebo háčky) je základní metodou tvorby netkaných textilií a představuje často jediný prostředek zpevňování netkaných textilií počínaje zdravotnickými a hygienickými výrobky pro jedno použití až po geotextilie pojené pod tryskou. Vlákná mohou být přírodní nebo chemická. Mohou být střižová nebo nekonečná nebo vytvářena přímo při výrobě netkané textilie.

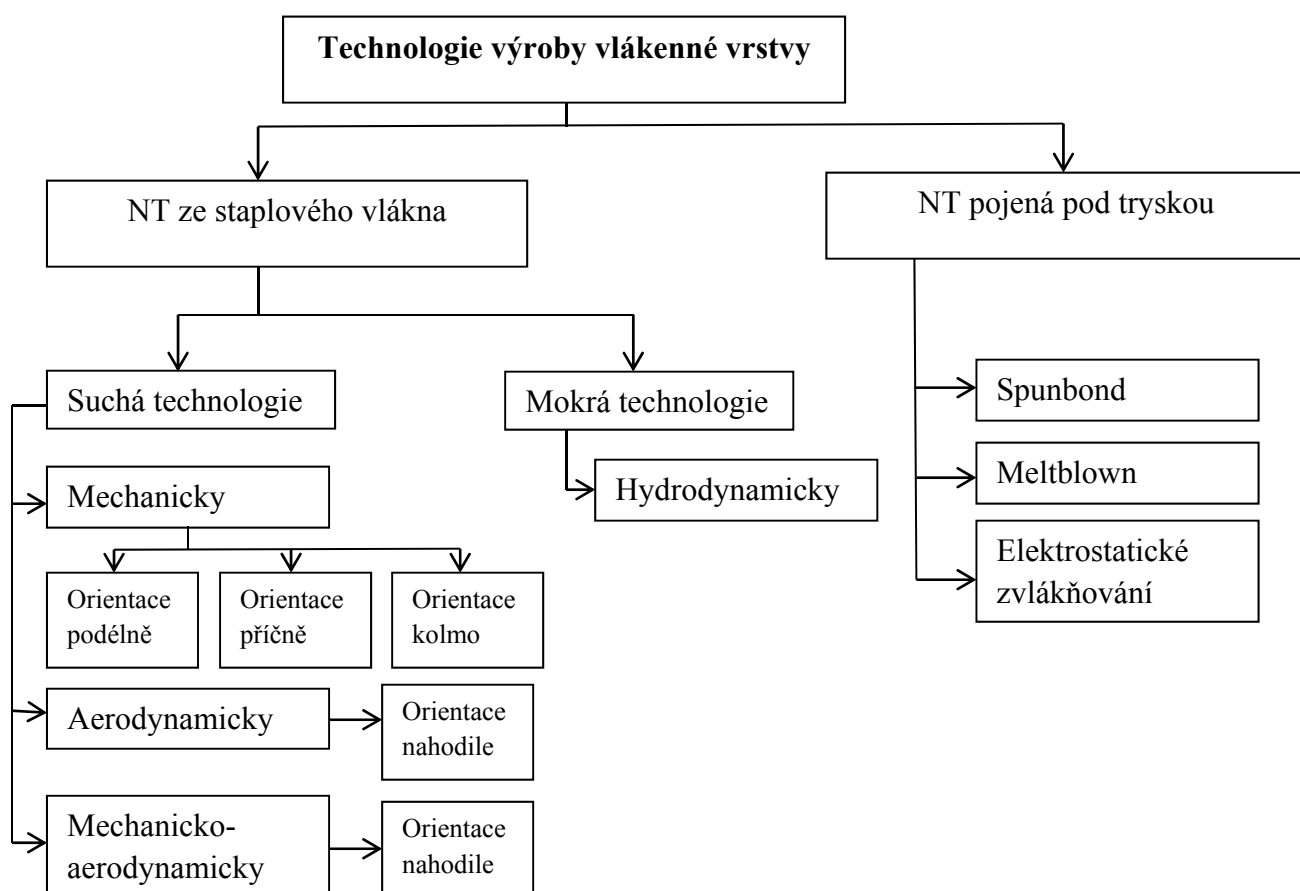
4.2 KLASIFIKACE NETKANÝCH TEXTILIÍ

Klasifikace NT není jednoduchou a jednoznačnou záležitostí z důvodu rozmanitosti surovin a výrobních technologií. NT lze klasifikovat například dle technologie výroby a způsobu zpevnění (viz. Tab. 6 a 7).

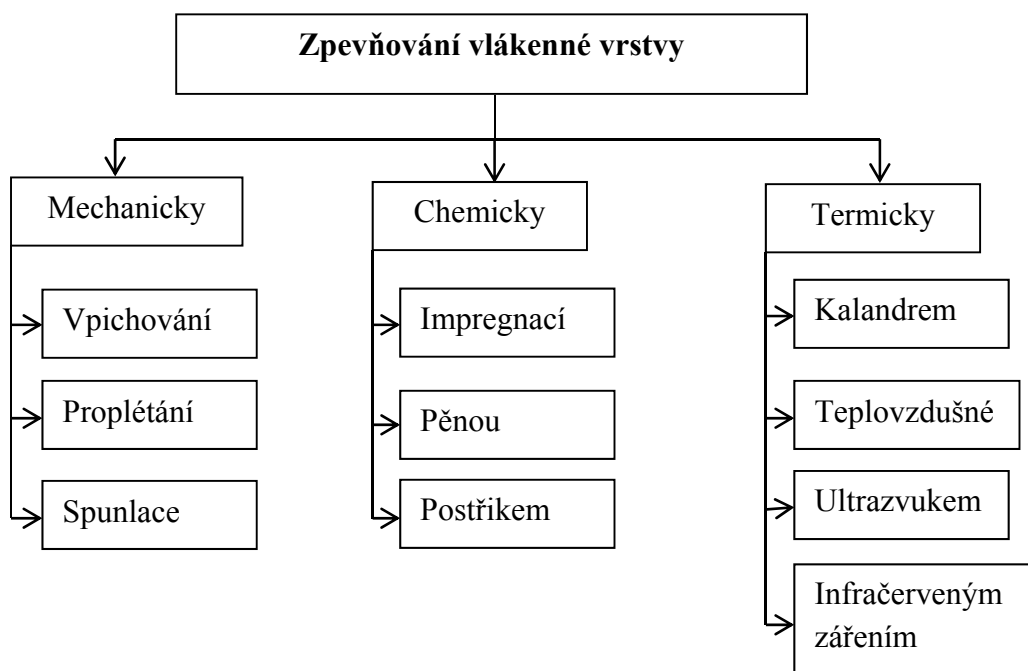
S rozmachem výroby netkaných textilií přichází i technologický rozmach a nové principy výroby, stroje a zařízení jsou neustále vyvíjeny a zdokonalovány.

V následujícím textu rešeršní části práce jsou popsány technologie výroby NT s ohledem na zpracování staplových vláken specifických parametrů a s ohledem na finální využití výrobků ve specifickém prostředí, tedy technologie pro recyklovaná staplová vlákna určité délky a technologie odolné vůči vysokým teplotám a chemické agresivitě.

Tab. 6 – Klasifikace NT podle technologie výroby [16]



Tab. 7 – Klasifikace NT podle způsobu zpevnění [16]



4.3 MECHANICKÉ ZPŮSOBY PŘÍPRAVY VLÁKENNÉ VRSTVY

Příprava vlákené vrstvy spočívá ve vytvoření co nejstejněoměrnejší vlákené pavučiny a ve vrstvení této pavučiny.

K přípravě vlákené pavučiny mechanickými způsoby se používají mykací stroje nebo mykací zařízení vyvinutá speciálně pro výrobu NT. Nejčastěji jsou využívány klasické mykací stroje válcové (vlnářské), pro svou větší šíři (1,5-3,5m) a vyšší výkon (200-1000kg/hod). Klasické mykací stroje víčkové (bavlnářské) zpracují pouze do 200kg/hod umělých vláken (5-30kg/hod ostatních vláken) v šíři cca 1 na 1,5 m.

Na mykacích strojích probíhá více procesů souběžně. Jedná se o jemné rozvolňování, čištění, ojednocování, promísení, urovnávání vláken do podélného směru a vytvoření rovnoměrné vlákené vrstvy – pavučiny. Ta je příliš jemná pro další manipulaci, a proto je většinou potřeba tyto pavučiny vrstvit.

4.3.1 VÁLCOVÝ MYKACÍ STROJ



Obr. 20 - Válnový mykací stroj [18]

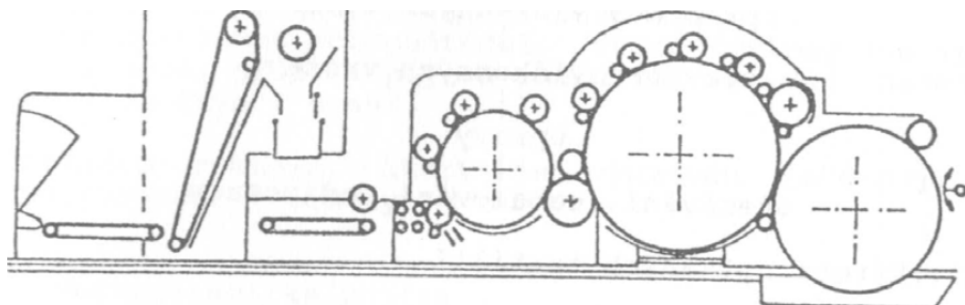
Válnové mykací stroje (viz. Obr. 20) se užívají ke zpracování materiálů vlnářského typu, pro lýková vlákna a pro dlouhá umělá vlákna, která vyžadují šetrnější rozvolňování.

Základem válcového mykacího stroje je soustava válců opatřených drátkovými nebo pilkovými pracovními povlaky. Drátky (hroty) jsou na válcích ve třech vzájemných postavení a to na mykání, na snímání a na povytažení (viz. Obr. 23).

Pracovními orgány stroje jsou pracovní válec, obraceč a hlavní buben (neboli tambur). Pracovní válec se otáčí stejným směrem cca stokrát pomaleji než tambur. Zachycuje nerozvolněné chomáčky vláken a přenáší je na obraceč, který je vrací na povlak tamburu. Před snímacím bubnem je umístěn pomocný válec (volant), jehož

drátky zapadají asi 1 mm do garnitury hlavního bubnu, zvedají zejména kratší vlákna a napomáhají tak práci snímače (viz. Obr. 21).

Uskutečňuje se lineární mykání.

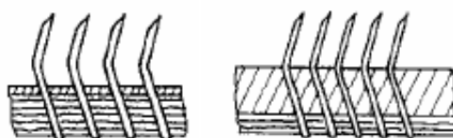


Obr. 21 – Schéma válcového mykacího stroje

Počet použitých válců při mykání závisí na druhu zpracovávaného materiálu. Pro umělá vlákna se využívá 3-4 páry válců, vlna a textilní odpady se mykají s 5-6 páry válců, při zpracování koudele je obvykle použito až 8 párů mykacích válců.

Mykací pracovní potahy

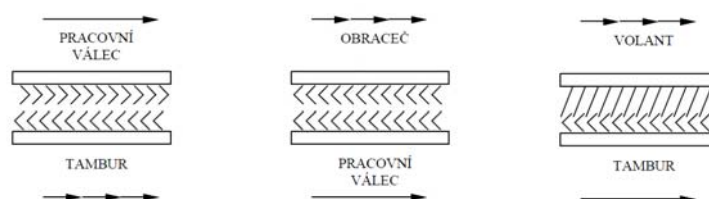
Všechny pracovní orgány mykacího stroje jsou opatřeny speciálními potahy, které umožňují vlastní mykací proces a přímo působí na vlákenný materiál. Povlaky mykacích strojů mohou být drátkové nebo pilkové. Drátkové mykací povlaky dále rozlišujeme dle typu a tloušťky drátků, dle jejich tvaru, dle počtu drátků na jednotku plochy potahu (viz. Obr. 22).



Obr. 22 - Drátkové mykací povlaky [19]

Druhy pracovních poloh

a vzájemné působení mykacích povlaků včetně vyznačení rychlostí:



Obr. 23 - Poloha na mykání – Poloha na snímání – Poloha na povyčesávání [16]

Účinek mykacího zařízení lze zvýšit:

- Větším počtem pracovních drátků či hrotů na plochu
- Větším rozdílem obvodových rychlostí tamburu a pracovních válců
- Těsnějším sesazením pracovních povrchů

Zpracování jemných vláken hrubšími povlaky vede ke vzniku nopků v pavučině. Naopak hrubá vlákna způsobují rychlejší poškození jemných povlaků. Vyšší intenzita mykání vede ke zvýšení ojednocovacího efektu a jednosměrné orientace vláken, zároveň k vyššímu namáhání povlaků, převodových mechanismů a motorů.

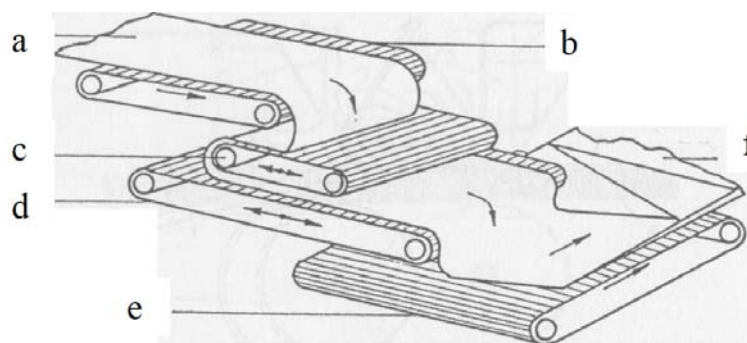
4.3.2 VRSTVENÍ VLÁKENNÉ PAVUČINY

Vláknenná pavučina vystupující z mykacích zařízení má plošnou hmotnost obvykle 5-30 g/m². Tuto pavučinu můžeme zpevnit, a tím vznikne lehká NT. Nebo můžeme tyto pavučiny vrstvit, a tím získat NT o vyšší plošné hmotnosti. Vrstvení lze provádět podélně, příčně či kolmo (technologie STRUTO), avšak nejvhodnější je použití příčného vrstvení.

Příčné vrstvení

Nejčastěji využívaný způsob přípravy vláknenné vrstvy je pomocí příčného kladení pavučiny na odváděcí pás. Odváděcí pás se pohybuje ve směru kolmém ke směru přívodu pavučiny. Nejčastěji se používá výkyvný vertikální kladeč a horizontální příčný kladeč (viz. Obr. 24).

Při příčném kladení dochází při vrstvení ke křížení pavučiny ve vláknenném rounu, kdy úhel křížení a plošná hmotnost je dána rychlostí pohybu ukládacího pásu a odváděcího pásu.



Obr. 24 - Horizontální příčný kladeč pavučiny [16]

a – pavučina, b - kladečí dopravník, c - kompenzační dopravník, d - kladečí dopravník,
e - odváděcí dopravník, f - příčně vrstvené rouno

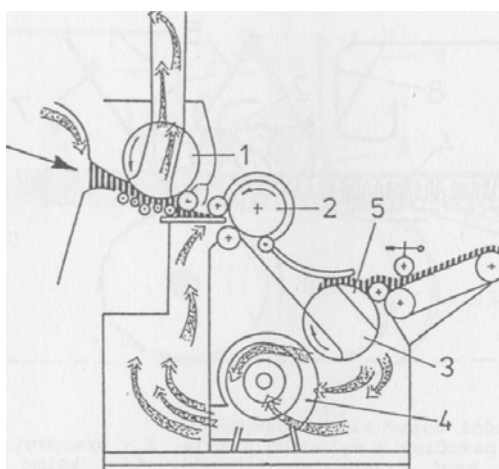
4.4 AERODYNAMICKÁ VÝROBA VLÁKENNÉ VRSTVY

Mezi největší výhody této technologie patří vznik izotropické struktury vyrobené vlákenné vrstvy. S touto nahodilou orientací vláken souvisí menší rozdílnost ve vlastnostech v příčném a podélném směru. Další výhodou je, že tato technologie umožňuje výrobu širokého rozsahu plošných hmotností a objemností vrstev.

Za nevýhodné lze považovat nízký stupeň ojednocení vláken a možnost zaplétání jednotlivých vláken v proudě vzduchu. Zaplétání vláken vytváří mrakovitou strukturu, která souvisí s plošnou nerovnoměrností rozložení vlákenné hmoty v rounu. Těmto nevýhodám lze předcházet, ale za cenu snížení výkonu zařízení, a tím vyšší energetické náročnosti procesu. Stupeň ojednocení lze zvýšit při nižším dávkování suroviny. Zaplétání vláken lze snížit zvýšením poměru vzduch/vlákna (na 1 m³ vzduchu 0,003 - 0,02 g vláken).

Další nevýhodu způsobuje nerovnoměrné proudění vzduchu, především v okolí postranních stěn zařízení, které vede k rozdílné orientaci vláken vzhledem k šířce textilie.

Princip aerodynamické tvorby rouna spočívá v rozvolnění vlákenné suroviny rychle se otáčejícím šhubacím válcem opatřeným pracovním povlakem. Ke snímání vláken z válce dochází kombinací účinku odstředivé síly a přiváděného proudu vzduchu. Vlákná jsou unášena a následně ukládána na pohybujičím se síťovém dopravníku (viz. Obr. 25). Aerodynamická příprava vlákenné vrstvy umožňuje zpracovávat pouze krátká vlákna do 50 mm.

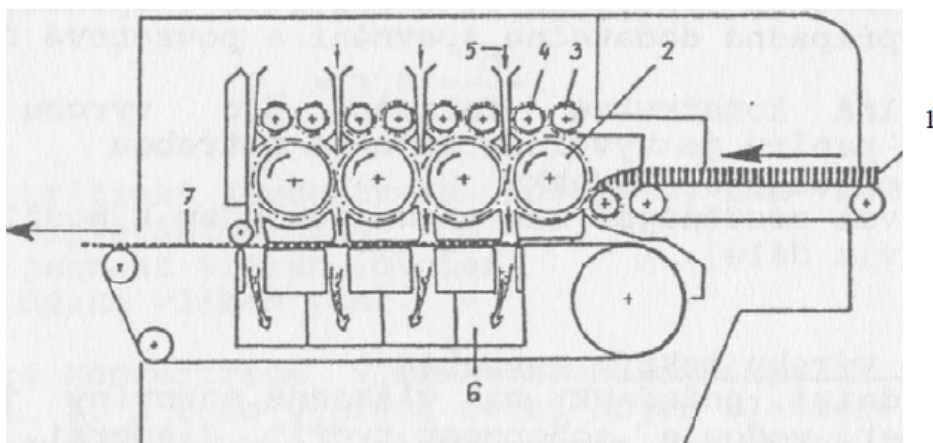


Obr. 25 - Zařízení pro aerodynamickou tvorbu rouna [16]

1 – kondenzor pro přívod vlákenného materiálu, 2 – šhubací válec, 3 – kondenzor pro tvorbu vlákenné vrstvy, 4 – ventilátor, 5 – vlákenná vrstva

4.5 MECHANICKO–AERODYNAMICKÁ VÝROBA VRSTVY

Zřízení vyvinuté speciálně pro výrobu NT, které současně využívá mechanických rozvolňovacích účinků, odstředivých a aerodynamických sil. U tohoto zařízení lze využít výkon stroje, ale ne na úkor kvality výrobku. Vzniká rovnoměrná vlákenná vrstva se strukturou téměř izotropickou. Mechanicko - aerodynamická výroba vlákenné vrstvy zpracovává vlákna do délky 50 mm.



Obr. 26 - Rounotvořič K 21 firmy Fehrer [16]

1 – přívod vláken, 2 – tambur, 3 – pracovní válec, 4 – obraceč, 5 – proud vzduchu, 6 – podtlak, 7 – odváděcí síťový adaptér

Jedno z nejnovějších vysokovýkonných zařízení vyrobené firmou Fehrer (viz. Obr. 26). Výstupní rychlosti rouna je 50-150 m/min. Zařízení zpracuje za hodinu 300kg vláken i při výrobě lehkých roun o plošné hmotnosti 40-100 g/m² v šíři 1metr.

Zařízení je sestaveno ze čtyř tamburů, kdy každý pracuje s jedním párem pracovní válec – obraceč. Mezi jednotlivými tambury jsou štěrby, kudy proudí vzduch takovou rychlostí, že strhává část vlákenného materiálu na síťový pás. Materiál, který není vzduchem stržen je přenesen z prvního tamburu na tambur druhý, třetí, čtvrtý a nakonec skončí na síťovém dopravníku. Opakující se proces ukládání vláken na síťový pás vede k vysoké rovnoměrnosti vyrobeného rouna i při nízké plošné hmotnosti.

4.6 ZPŮSOBY ZPEVNĚOVÁNÍ VLÁKENNÉ VRSTVY

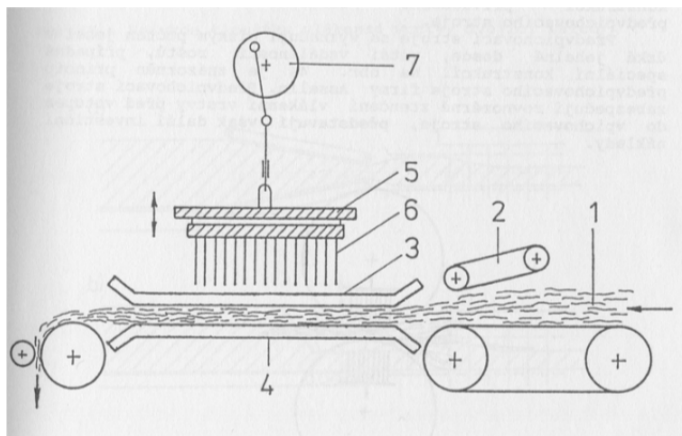
4.6.1 TECHNOLOGIE VPICHOVÁNÍ

Technologie vpichování je nejrozšířenější způsob pro zpevňování vláknenných vrstev, zároveň je považována za nejstarší technologii výroby NT.

Princip vpichování je založen na provazování vláknenné vrstvy svazky vláken vzniklými reorientací části vláken účinkem průniku jehel s ostny. Soudržnost vpichovaných textilií spočívá ve tření mezi vlákny. V průběhu procesu vpichování dochází k podstatné redukci tloušťky vláknenné vrstvy, ke změně délky a šířky textilie a k výrazné přeorientaci všech vláken ve vláknenné vrstvě. Vláknenné rouno lze vpichováním zpevnit, ztenčit, případně spojit s nosným podkladem (textilií, folií).

Plošná hmotnost vpichovaných netkaných textilií se pohybuje v rozmezí 100 – 2000g/m².

Technologií vpichování lze zpracovávat prakticky všechny druhy vláken, které se dají předkládat ve formě rouna, nejčastěji zhotoveného na válcových mykacích strojích.



Obr. 27 - Schéma vpichovacího stroje [16]

1 – vláknenná vrstva, 2 – šikmý dopravník, 3 – stěrací rošt, 4 – opěrný rošt, 5 – jehelná deska, 6 – vpichovací jehla, 7 – pohon jehelné desky

Vláknenná vrstva je přiváděna vstupním zařízením (dvojicí válců nebo šikmými dopravníky) mezi dva perforované rošty. Přiváděcí zařízení má za úkol i redukci tloušťky přiváděné vláknenné vrstvy. V perforovaných roštech jsou otvory, kterými pravidelně pronikají vpichovací jehly umístěné v jehelné desce. Při průniku jehel vláknennou vrstvou ostny jehel zachytávají skupinky vláken vrstvy, přeorientovávají je

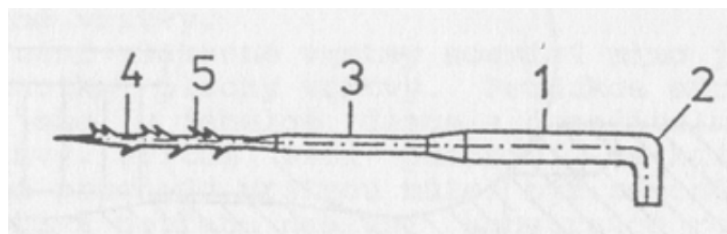
kolmo k vrstvě a protahují vrstvou. Navpichovaná vrstva je odtahována odtahovými válci po spodním opěrném roštu (viz. Obr. 27).

Vpichovací stroje se staví v šířce 1-8 metrů, u speciálních strojů může být šíře až 16 metrů.

Frekvence vpichů jehelné desky je běžně u moderních strojů 1200 zdvihů za minutu, u špičkových zařízení až 2200 zdvihů za minutu za předpokladu, že výška zdvihu nepřesáhne 60 mm. Z toho vyplývá potřeba redukovat tloušťku přiváděného rouna za pomoci vhodného ústrojí na tuto míru (někdy až z 25 cm) nebo se musí použít tzv. předvpichovací stroj s řidším ojhlením a větší vzdáleností perforovaných desek, to však představuje další investiční náklady. Přiváděcí zařízení musí redukovat tloušťku výchozí vlákenné vrstvy na rozměr menší, než je vzdálenost roštů a to konstantně, bez vzniku nerovnoměrností. Na jehelné desce jsou jehly připevněné v několika řadách tak, že na 1 cm rouna připadá 20 – 50 jehel (každá s 5-10 ostny). Hustota vpichů je v rozmezí 5000 – 50000/m². Síla působící na každou jehlu při průchodu vlákennou vrstvou může být až 10N. V závislosti na různých faktorech lze vyrobit až 2000m² plošné textilie za hodinu. [31]

Vpichovací jehla

Existují různé druhy vpichovacích jehel. Obvyklý průřez pracovní části jehly je ve tvaru rovnostranného trojúhelníka. Vpichovací ostny jsou na jedné, dvou, častěji na všech třech stranách. Ostny mohou být od sebe různě vzdálené, mohou mít i různou výšku. Jehly mohou být různé délky (viz. Obr. 28).



Obr. 28 - Vpichovací jehla [16]

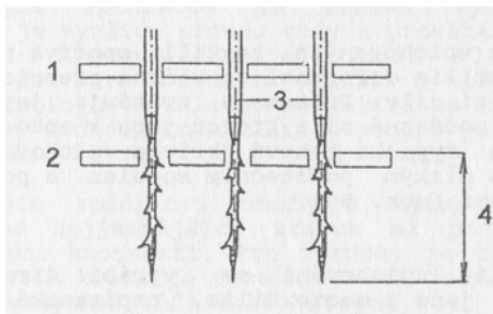
1 – stvol, 2 – kolínko, 3 – redukováná část, 4 – pracovní část, 5 – ostn

Základními parametry procesu vpichování jsou:

a) Počet vpichů na jednotku plochy

b) Hloubka vpichu

Jde o vzdálenost špiček jehel od pracovní plochy opěrného roštu v dolní úvrati pohybu jehel. Hloubka vpichu se pohybuje v rozmezí 5-25 mm (viz. Obr. 29).



Obr. 29 - Schematické znázornění hloubky vpichu [16]

1 – stírací rošt, 2 – opěrný rošt, 3 – vpichovací jehla, 4 – hloubka vpichu

c) Typ a způsob rozmístění vpichovacích jehel

d) Tahové vlastnosti, délka, jemnost a povrchové vlastnosti vláken

Výsledná struktura a vlastnosti vpichované textilie jsou ovlivněny mnoha okolnostmi, avšak zásadně je ovlivňují parametry počet vpichů a hloubka vpichu.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jak již bylo uvedeno v úvodu, teoretické části a v samotném zadání této diplomové práce, snahou je najít uplatnění pro recyklovaná uhlíková vlákna tak, aby bylo využito vynikajících vlastností těchto vláken. Důvodem výběru tohoto materiálu je zejména odolnost uhlíkových vláken vůči působení tepla a plyných emisí ve spalínách za podmínek, kdy by mohlo dojít k poškození, nebo destrukci vláken jiných materiálů. Při úvahách o filtraci spalín malých energetických zdrojů je třeba počítat s teplotami zhruba 400 °C, krátkodobě však až 600 °C, při současném působení vodních par a plyných emisí. V těchto podmínkách nelze spoléhat ani na vlákna skleněná.

Cílem této práce je zjistit, zda je možné z recyklovaných uhlíkových vláken vyrobit filtry a zda tyto filtry budou mít účinné filtrační vlastnosti, a tím by bylo nalezeno možné uplatnění recyklovaných vláken ve filtraci za vysokých teplot.

Experimentální část je rozdělena na tři části.

První část experimentu je zaměřena na analýzu dodaných recyklovaných uhlíkových vláken

Druhá část se týká konstrukce vzorků filtrů. Úkolem bylo připravit vzorky poloprovozních filtrů s proměnlivými parametry zvolených technologií výroby a plošné hmotnosti.

Třetí část experimentu je zaměřena na testování a vyhodnocení filtračních schopností různých typů filtrů z recyklovaných uhlíkových vláken. Tato část popisuje zkoušky, které byly na vzorcích prováděny, a vyhodnocuje získaná data z testování.

5. ANALÝZA DODANÝCH RECYKLOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Recyklovaná staplová uhlíková vlákna použitá k experimentu byla dodána společností Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s., která prováděla recyklaci z kompozitu uhlík-epoxid, (kompozit vyroben ručním kladením prepregu a vytvrzením v autoklávu) pomocí pyrolýzního – teplotního rozkladu při teplotě zpracování $T_z=550^\circ\text{C}$ viz kapitola 3.1.2.

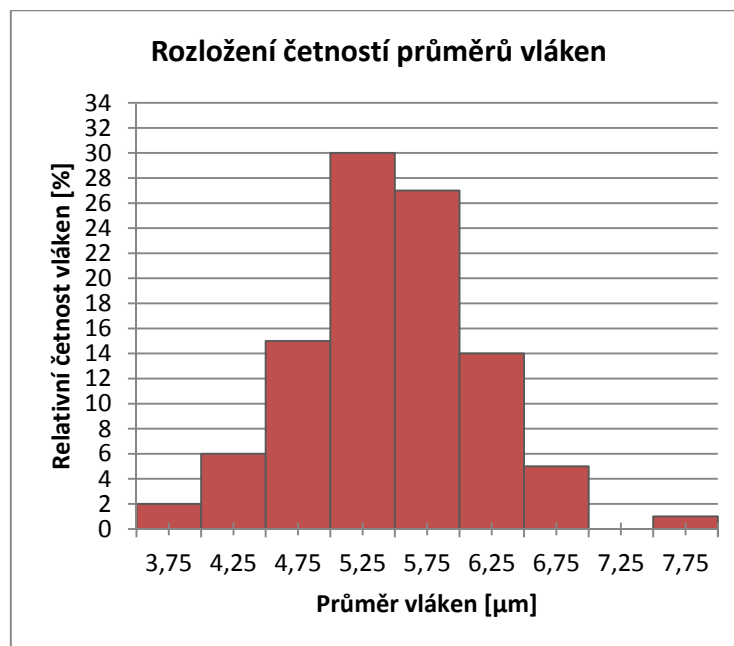
Parametry vláken

Mezi parametry vláken zahrnujeme především jejich průměr, tvar průřezu, preparace, mechanické charakteristiky apod. Vliv průměru vláken se projevuje při všech filtračních mechanismech.

5.1 PRŮMĚR VLÁKEN

K měření průměrů vláken byly připraveny preparáty podélných pohledů vláken. Světelným optickým mikroskopem Nikon Eclipse LV100 byl vytvořen obraz, který byl sejmut kamerou a zobrazen na monitoru počítače (viz. Obr. 30). Mikroskop je součástí systému obrazové analýzy Lucia G.

Princip zkoušky spočíval ve změření 100 podélných pohledů na vlákno a zjištění šířky vlákna, tzn. délky kolmé na osu vlákna (viz. Obr. 31). Naměřené hodnoty byly zpracovány ve statistickém programu.



Obr. 30 - Grafické znázornění četností průměru vláken

Diskuze výsledků:

Z grafického zobrazení výsledných četností průměrů vláken lze pozorovat, že 30% průměrů měřených vláken se pohybuje v rozmezí 5 – 5,5 μm a 27% vláken se pohybuje v rozmezí 5,5 – 6 μm . Četnost hodnot 2% do 4 μm a 1% hodnot nad 7 μm odpovídající dvěma (resp. jednomu) naměřenému průměru, lze považovat za výchylku, ke které mohlo dojít chybným měřením (viz. Příloha č. 4).



Obr. 31 – Detail recyklovaných uhlíkových vláken pod mikroskopem z obrazové analýzy

5.2 DÉLKA VLÁKEN

Dodaná recyklovaná vlákna byla ve VZLÚ nařezána po celých svazcích na délku 6 cm. V dodaných vláknech však byly výjimečně i svazky vláken jiných délek, a to v rozmezí 4,5 cm – 10 cm.

Přímá metoda měření délky vláken, tedy měření délky jednotlivých vláken se nezdařila. Vlákna se pro svou křehkost při manipulaci pomocí pinzety lámala.

Mechanické charakteristiky a další parametry recyklovaných uhlíkových vláken jsou popsány v kapitole 3.3 „Vlastnosti recyklovaných uhlíkových vláken“ dle Zprávy č.R4449, vydané VZLÚ. Podrobnější analýza nebyla nutná, neboť mechanické vlastnosti nejsou u této aplikace klíčové.

Dle analýzy vláken byla navržena technologie výroby poloprovodních vzorků filtrů:

- Výroba vlákenné vrstvy mykáním
- Vrstvení příčným kladením
- Zpevnění vrstvy vpichováním

6 VÝROBA SÉRIE POLOPROVOZNÍCH VZORKŮ FILTRU

Příprava vzorků filtračních materiálů probíhala ve dvou fázích. V první fázi byly vyrobeny na mykacím zařízení 4 vláknenné vrstvy z uhlíkových vláken. Tyto vrstvy byly zpevněny rozdílným počtem vpichování. V jednom případě byla k uhlíkové vláknenné vrstvě přidána vrstva z teflonových vláken, která se vpichováním spojila s uhlíkovou vrstvou. Z těchto vrstev byly vysekány vzorky filtrů a podrobeny testu na syntetický prach - přístroj DFT-3 a testu aerosolem NaCl. Výsledné hodnoty byly porovnány a konzultovány a byl dohodnut postup druhé fáze přípravy filtračních materiálů, které se následně použily pro testování a výsledky jsou uveřejněny v této práci.

6.1 VÝROBA A ZPEVNĚNÍ VLÁKENNÉ VRSTVY

Souhrnný popis základních technologií přípravy filtrů je uveden v Tab. 8. Vzhledem k tomu, že výroba nebyla kontinuální, docházelo ke kolísání hmotnosti připravených vláknenných vrstev. Proto byly pro další testy vybrány pouze vzorky viditelně hmotově stejnoměrné.

Tab. 8 – Souhrn parametrů vyrobených vzorků filtrů

SKUPINA	VÝROBA VLÁKENNÉ VRSTVY	VRSTVENÍ počet vrstev	ZPEVNĚNÍ vláknenné vrstvy	POČET VYROBENÝCH VZORKŮ FILTRU	VZORKY POUŽITÉ PRO DALŠÍ TESTY	OZNAČENÍ POUŽITÝCH VZORKŮ
1.	mykání	1/3	1x vpichování	4	4	1.1; 1.2; 1.3; 1.4
2.	mykání	2/3	2x oboustranné vpichování	6	2	2.1; 2.2
3.	mykání	1	2x oboustranné vpichování	8	4	3.1; 3.2; 3.3; 3.4
4.	mykání	2	2x oboustranné vpichování	8	5	4.1; 4.2; 4.3; 4.4; 4.5
5.	mykání	3	2x oboustranné vpichování	8	4	5.1; 5.2; 5.3; 5.4;
6.	mykání	1	2x oboustranné vpichování	6	0	----

- VÝROBA VLÁKENNÉ VRSTVY - MYKÁNÍ**

Na laboratorních vahách bylo naváženo 50g uhlíkových vláken. Toto množství bylo následně načechráno na příváděcí dopravník válcového mykacího stroje na plochu 50x30cm. Poté probíhalo mykání. Snímací válec následně přiváděl namýkanou vrstvu

na odváděcí válec o poloměru 27cm, který byl pokryt lehkou netkanou textilií pro lepší zachycení vlákně vrstvy na válci. Po navinutí souvislé vlákně vrstvy na odváděcí válec bylo zařízení vypnuto a netkaná textilie s vlákně vrstvou z válce sejmuta. Tímto způsobem vznikly veškeré vlákně vrstvy o velikosti cca 84x38cm. Technologie mykání na válcovém mykacím stroji je podrobněji popsána v kapitole 4.3.1.

- **VRSTVENÍ VLÁKENNÉ VRSTVY**

Po výrobě vlákně vrstev došlo k podélnému vrstvení mechanicky, přiložením vrstev na sebe. Vznikla dvouvrstvá a třívrstvá vlákně vrstva. V jednom případě došlo k rozdělení vlákně vrstvy v poměru 1/3 a 2/3.

- **ZPEVNĚNÍ VLÁKENNÉ VRSTVY - TECHNOLOGIE VPICHOVÁNÍ**

Jako technologie zpevnění vlákně vrstev byla vybrána technologie vpichování. Tato technologie je podrobněji popsána v kapitole 4.6.1.

Tab. 9 – Hodnoty pro vpichování a pro výpočet počtu vpichů na jednotku plochy

ZKR.	POPIS	HODNOTA
	Typ jehel	15x18x36x3,5
	Hloubka vpichu	10 [cm]
f	Frekvence zdvihu desky	136 [min^{-1}]
a	Počet jehel (na metr šíře stroje)	1260
v	Odváděcí rychlost textilie	0,5 [m/min]
p	Počet průchodů textilie strojem	1 nebo 2
V_p	Počet vpichů na m^2	342 720 vpichů/ m^2 pro vrstvu 1x vpichovanou
		685 440 vpichů/ m^2 pro vrstvu 2x vpichovanou

$$V_p = \frac{a f p}{v} \quad (1)$$

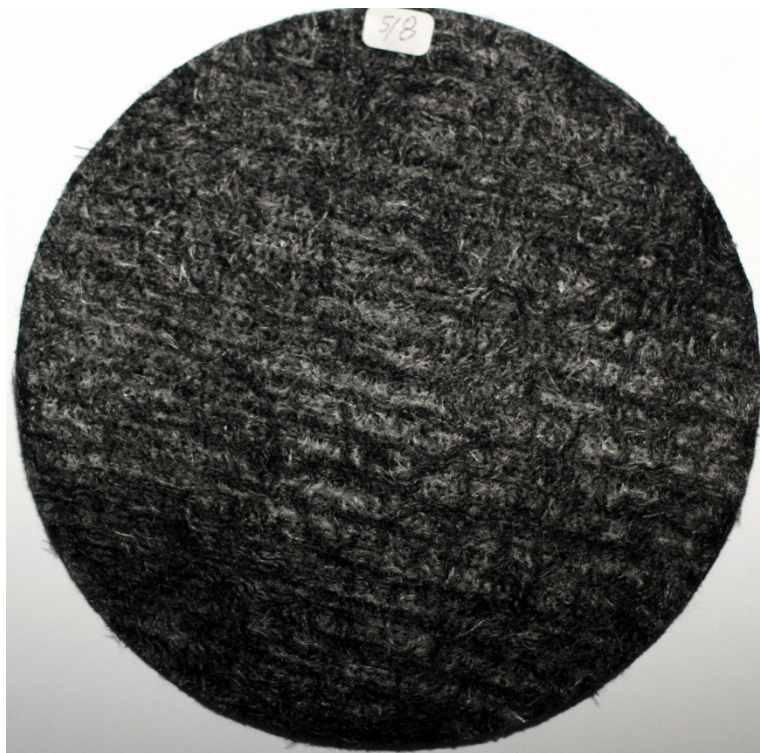
V_p - počet vpichů na m^2

a - celkový počet jehel na 1m vpichovací desky ve všech řadách dohromady

f - frekvence desky (s^{-1})

p - počet průchodů textilie strojem

v - rychlost odvádění textilie (m.s^{-1})



Obr. 32 - Vyrobený vzorek filtru se znatelným vpichováním

6.2 PARAMETRY VYROBENÝCH FILTRŮ

Parametry filtračního materiálu jsou vstupní proměnné, které určují průběh procesu filtrace a tím i výsledné filtrační vlastnosti.

6.2.1 PLOCHA FILTRU

Velikost filtrační plochy má výrazný vliv na tlakový spád. Zvýšení filtrační plochy by mělo snížit tlakový spád, zvýšit životnost filtru a má i vliv na efektivitu filtru.

Filtrační plocha je $0,01\text{m}^2$ u testování aerosolem NaCl i při testování na DFT-3.

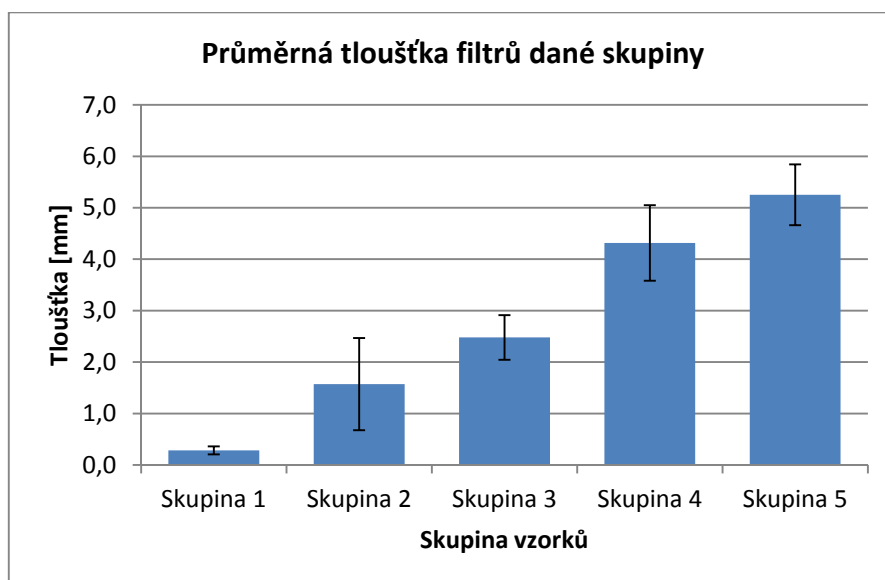
6.2.2 TLOUŠŤKA FILTRU

Tloušťka filtru zvyšuje efektivitu zachytu částic, nicméně s přibývající tloušťkou se její vliv na zlepšení filtrace zmenšuje.

Tloušťka vzorků byla měřena pomocí tloušťkoměru u všech vzorků, tzn. i vzorků vyloučených z následného testování z důvodu lokální nestejnoměrnosti. Tloušťka byla měřena u každého vzorku na pěti různých místech, u vyloučených vzorků v jiných místech, než byla značná nestejnoměrnost (viz. Příloha č. 3).

Tab. 10 - Parametry tloušťkoměru

Průměr	5,65 [cm]
Plocha	25 [cm ²]
Přítlak na plochu 25cm ²	125 [g]
Tlak 5kg/m ²	50 [Pa]



Obr. 33 – Grafické znázornění porovnání průměrné tloušťky vzorků filtrů dle dané skupiny

Diskuze výsledků:

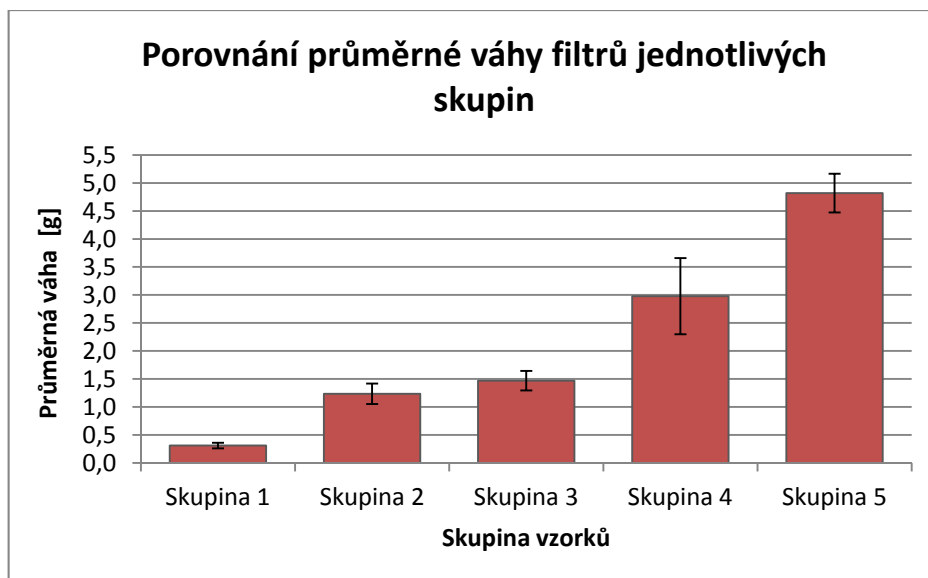
Na Obr. 33 jsou graficky porovnány zprůměrované tloušťky filtrů dle jednotlivých skupin, z kterého je patrné, jaký vliv mělo vrstvení vlákných rovin na tloušťky. V grafu jsou znázorněny chybové úsečky, které představují směrodatnou odchylku vzhledem k jednotlivým naměřeným hodnotám pro určitý filtr nebo skupinu. Na grafickém zobrazení (viz. Příloha č. 3) průměrné tloušťky jednotlivých filtrů lze pozorovat nepatrnou nerovnoměrnost, která byla způsobená při mykání vlákné vrstvy. Dále lze pozorovat, že při vrstvení je rostoucí tloušťka filtrů patrná.

6.2.3 PLOŠNÁ HMOTNOST FILTRU

Plošnou hmotností lze velmi jednoduchým způsobem zvýšit filtrační účinnosti, avšak toto je zároveň provázeno růstem tlakového spádu.

Jednotlivé vzorky filtrů, vybrané k dalšímu testování, byly zváženy na laboratorních vahách značky Kern ABS s $d=0,1\text{mg}$ a max. 120 g (viz. Příloha č. 5).

Plocha všech vzorků je $0,018\text{ m}^2$.



Obr. 34 – Grafické znázornění průměrné váhy filtrů dané skupiny



Obr. 35 – Grafické porovnání průměrné plošné hmotnosti filtrů daných skupin

Diskuze výsledků:

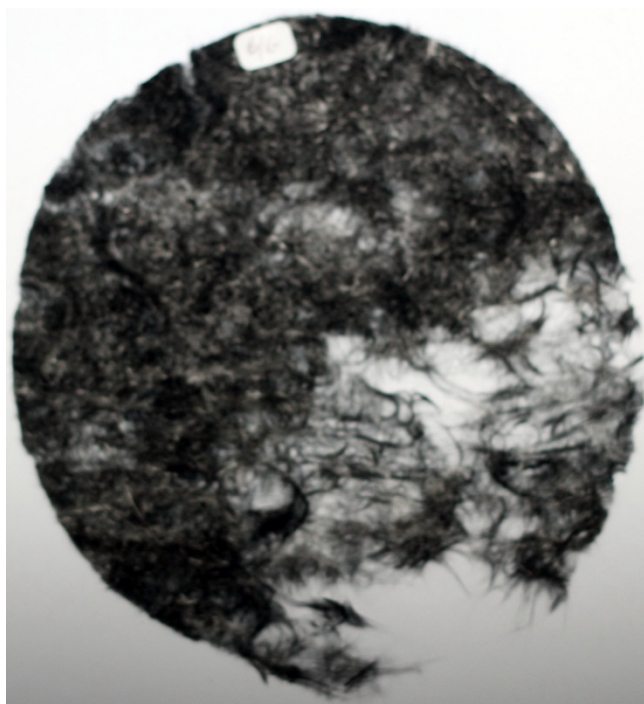
Z Obr. 34 a 35 je patrné, že byl splněn požadavek na výrobu poloprovodných vzorků filtrů s proměnnými parametry plošné hmotnosti, čehož bylo docíleno různým vrstvením vláknenného rouna. Chybové úsečky znázorněné v grafu uvádí směrodatnou odchylku.

6.2.4 STEJNOMĚRNOST MATERIÁLU

Hmotová stejnoměrnost má na proces filtrace výrazný vliv. Tvar proudění filtrovaného média je určován minimalizací odporové síly vzniklé protékáním

viskózního média porézním prostředím. Z toho důvodu místem s lokálně nižším zaplněním projde v čase větší množství částic, než místem se zaplněním lokálně vyšším.

Jednotlivé vzorky byly prohlédnuty proti světlu. Kvůli značným nestejnoměrnostem v lokálních částech některých vzniklých filtračních vzorků, byly tyto vzorky vyřazeny z dalšího měření (skupina vzorků č. 6 byla vyřazena celá viz. Obr. 36).



Obr. 36 - Vyřazený vzorek se značnou nestejnoměrností

7 VYHODNOCENÍ FILTRAČNÍCH VLASTNOSTÍ VZORKŮ FILTRŮ

Testy filtračních vlastností se provádějí z důvodu hodnocení vlastností reálných filtrů, nebo z důvodu ověřování teoretických předpokladů na modelových, nebo reálných filtrech. Existuje množství druhů testů pro ověření teoretických předpokladů, lze také použít testy normované určené k hodnocení reálných filtrů.

Na vybraných vyrobených vzorcích byly provedeny dva testy. Prvním testem byl „Sodium Chlorid Filter Test Flame“ neboli test aerosolem NaCl, tento test byl použit jako doplňkový, neboť je určen spíše pro vysoce účinné filtry a byl proveden jako první, protože při něm nedochází ke znehodnocení filtrovaných materiálů. Druhým testem byl test syntetickým prachem na přístroji DFT-3, kterým došlo ke znehodnocení vzorků. [27], [28], [33]

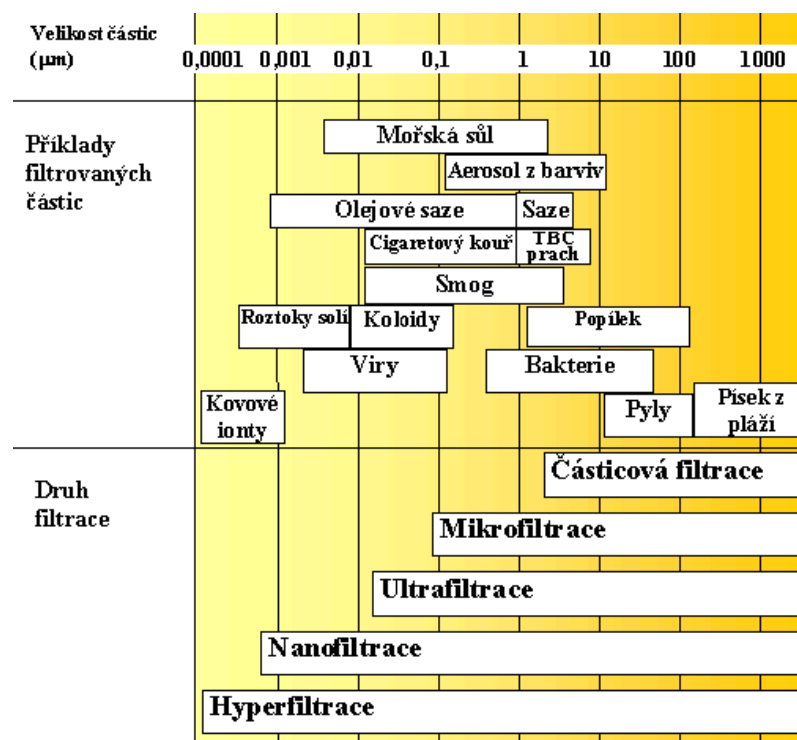
7.1 PARAMETRY FILTROVANÝCH ČÁSTIC

- **Velikost částic disperzního podílu**

Velikost zachytávaných částic je hlavním faktorem určujícím typ použitého filtru a parametry procesu filtrace. Z pohledu efektivity filtrace je nejkritičtější velikost filtrovaných částic od 0,1 do 1 μm . Pro částice větší, než 1 μm platí, že s růstem velikosti částic roste i efektivita zachytu.

Tab. 11 – Velikost částic jednotlivých metod testování

Metoda	Testovací materiál	Velikost částic
Test syntetickým prachem	SPONGELIT (sklářský Tripo D)	83% do 5 μm 90% do 10 μm
Test aerosolem NaCl	Částice NaCl	0,02-2 μm medián 0,65



Obr. 37 - Příklady filtrovaných částic, jejich velikosti a typy filtrace. [27]

- **Koncentrace částic**

Koncentrace částic ve vzduchu má zásadní vliv na sekundární jevy procesu filtrace, kdy částice zaplňující mezivláknenné prostory a mění výrazně filtrační vlastnosti. Je jasné, že s přibývajícím koncentrací částic ve vzduchu se zvyšuje i míra růstu tlakového spádu a efektivity. Jinými slovy koncentrace částic určuje životnosti filtru.

Tab. 12 - Koncentrace částic jednotlivých metod testování

Metoda	Výpočet		Koncentrace částic [g/m ³]
Test syntetickým prachem	Dávka prachu na jedno měření	cca 0,105[g]	1,26
	Definovaný průtok	2500 [l/hod]	
	Doba dávkování prachu	120 [s]	
Test aerosolem NaCl	Konstatní dávka přístrojem		0,013

7.2 PARAMETRY PROCESU FILTRACE

- Rychlost náletu částic na filtr

Rychlost filtrace má výrazný vliv na jednotlivé mechanismy filtrace. Přesný vztah mezi rychlostí filtrace a celkovou efektivitou zachytu je složitý. Nicméně s jistou dávkou zjednodušení lze říci, že pro velké částice s velkou měrnou hmotností je vhodnější větší filtrační rychlost, zatímco pro malé částice (průměry řádově mikrometry a menší) efektivita jejich zachytu s rostoucí rychlostí filtrace klesá.

Tab. 13 - Náletová rychlost částic jednotlivých metod testování

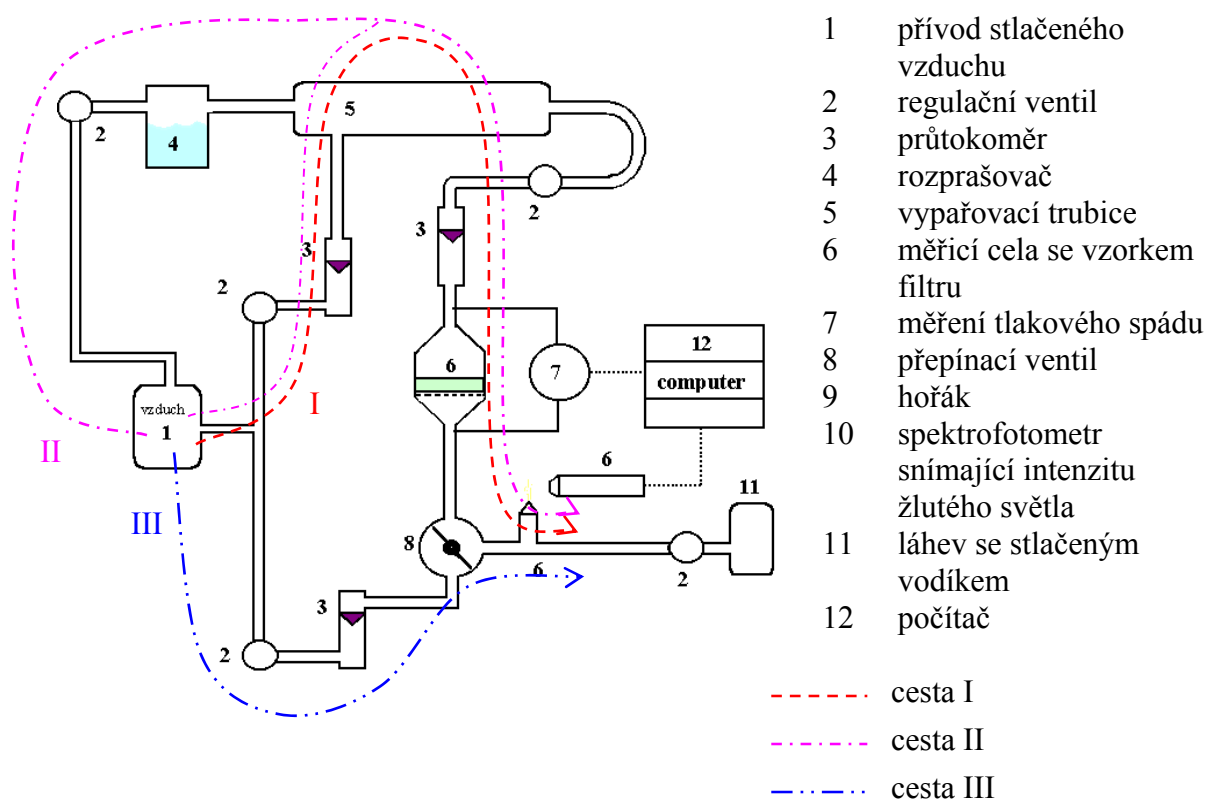
Metoda	Výpočet		Náletová rychlost [m/min]
Test syntetickým prachem	Definovaný průtok	2500 [l/hod]	4,2
	Filtrační plocha	0,01 [m ²]	
Test aerosolem NaCl	Změřeno přístrojem		5

7.3 TESTOVÁNÍ FILTRŮ

7.3.1 TEST AEROSOLEM NaCl

Test aerosolem NaCl byl použit pro doplňkové měření efektivy zachytu a tlakového spádu filtrů, tento test se používá hlavně na jemné a vysoce účinné filtry (HEPA filtry). Všechny testy byly provedeny v souladu s normami týkajícími se dané testovací metody. Většina testů odpovídala normě BS 4400.

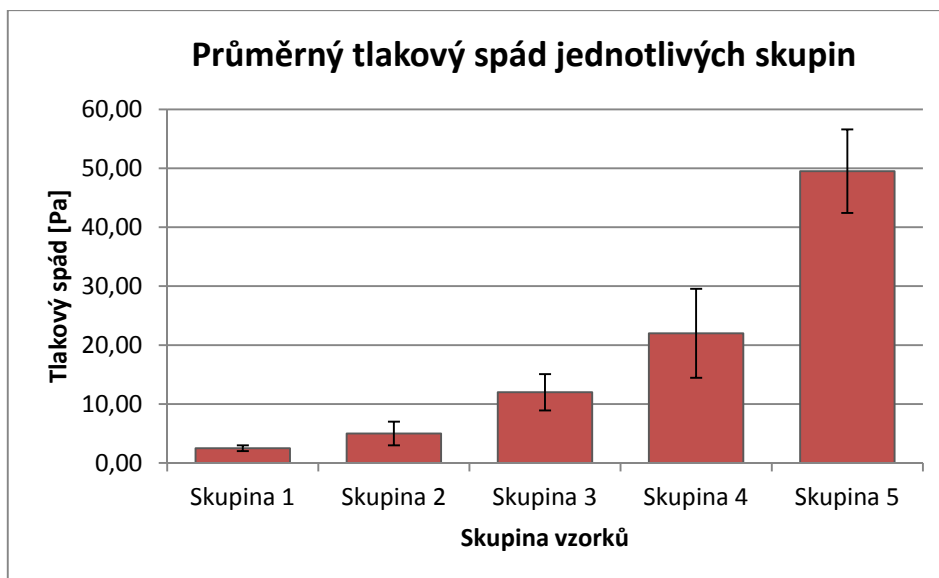
Testovací plocha (filtrační plocha) je 100 cm².



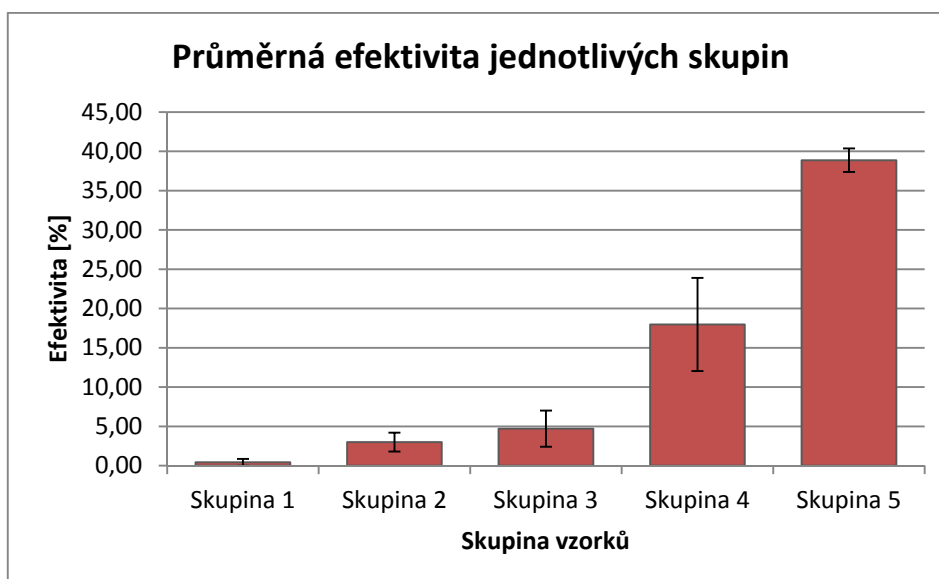
Obr. 38 - Schéma principu přístroje pro testování aerosolem NaCl [27]

Roztok 10% NaCl je rozprášen a zbaven vody ve vypařovací trubici. Výsledkem jsou částice soli definované velikosti. Tyto částice nalétávají definovanou rychlostí na testovaný vzorek (zároveň je snímán tlakový spád vzorku). V hořáku hoří modrý plamen směsi vodíku a vzduchu. Projdou-li testovaným filtrem částice NaCl, obarví plamen směsí do žluta. Detektorem proniknuvších částic je spektrofotometr (viz. Obr. 38). Čím více částic, tím větší intenzita žluté barvy plamene. Intenzitu žluté barvy plamene snímá spektrofotometr. Výstupem je hodnota penetrace [%] a tlakového spádu [Pa]. Z toho lze odvodit efektivitu.

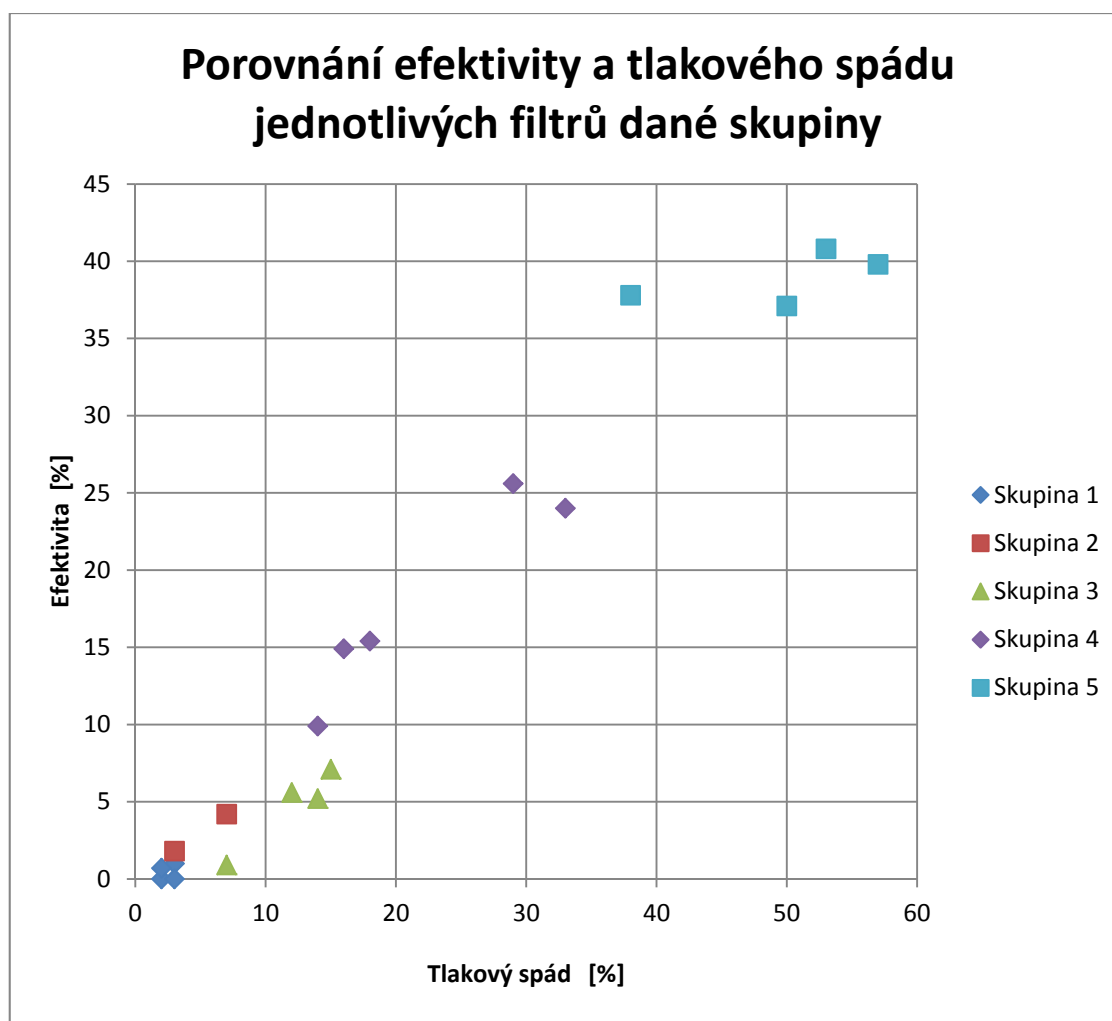
$$Efektivita = 100 - penetrace [\%] \quad (2)$$



Obr. 39 - Grafické znázornění průměrného tlakového spádu jednotlivých skupin



Obr. 40 – Grafické znázornění průměrné efektivity jednotlivých skupin



Obr. 41 – Grafické znázornění vztahu mezi efektivitou a tlakovým spádem vzorků filtrů jednotlivých skupin

Diskuze výsledků:

Z grafů na Obr. 39 a 40 lze vyčíst, že tlakový spád i efektivita filtrů s rostoucí tloušťkou (plošnou hmotností) rostou také. V grafech je znázorněna i chybová úsečka pro každou skupinu zvlášť, která představuje potenciální velikost chyby, resp. možnost rozmezí hodnot dané skupiny (viz. Příloha č. 2).

Faktor kvality je počítán jako podíl efektivity a tlakového spádu. Graf na Obr. 41 tento poměr zobrazuje. Nejlepší možností je dosáhnout co nejvyšší efektivity na co nejnižší tlakový spád. Je tedy zřejmé, že skupina vzorků 4 (fialová) je kvalitnější, než skupina 3 (zelená) – mají stejný tlakový spád, ale skupina 4 má vyšší efektivitu. Data nevykazují žádné velké výkyvy.

7.3.2 TEST SYNTETICKÝM PRACHEM – přístroj DFT-3

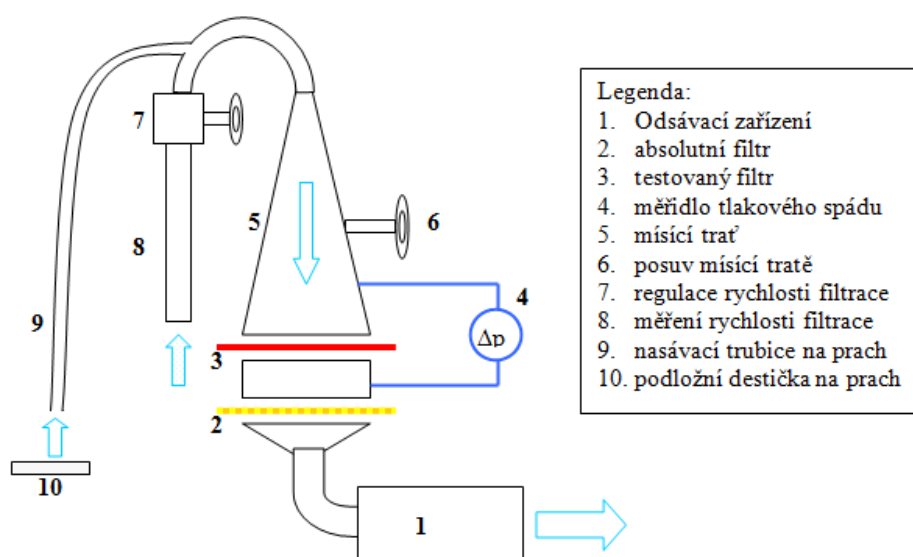
Test syntetickým prachem byl použit pro vyšetření změny filtračních vlastností v průběhu filtrace na přístroji Dust Filter Tester DFT-3.

Přístroj DFT-3 (viz. Obr. 42) byl sestaven Ing. Hružou jako zjednodušená verze přístroje Dust Filter Tester DFT-2 a slouží pro výuku studentů. Zařízení bylo sestaveno tak, aby co nejvíce odpovídalo části normy EN 779 (respektive ASHRAE 52), jež pojednává o testování syntetickým prachem.

Tento test se obvykle používá pro hrubší filtry filtračních tříd G.



Obr. 42 – Přístroj DFT-3 [27]



Obr. 43 - Schéma měřicího zařízení Dust Filter Tester DFT-3 [27]

Testovaným filtrem prochází směs vzduchu a testovacího prachu. Částice prachu, které proniknou testovaným filtrem, jsou zachyceny filtrem absolutním (viz. Obr. 43). Měří se tlakový spád, efektivita a jímavost filtru. Efektivita záchytu částic je zjištěna gravimetricky zvážením prachu proniklého testovaným filtrem (zachyceného na absolutním filtru) a prachu neproniklého (zachyceného na testovaném filtru). Měření probíhá za definované náletové rychlosti prachu (např. 1 m/sec), koncentrace prachu (cca. 120 mg/m³) a ploše filtru (0,01m²). Na jednom vzorku se jednotlivá měření opakují až do dosažení předem určené tlakové ztráty (250 Pa pro filtry tříd G a 400 Pa pro filtry tříd F).

K testování byly připraveny vzorky absolutního filtru. Zkušební i absolutní filtry byly zváženy na laboratorních vahách. Následně bylo naváženo 0,25g testovacího prachu SPONGELIT. Testovací prach byl dávkován rovnoměrně po dobu dvou minut. Před prvním podáním testovacího prachu byl na tlakoměru změřen tlakový spád čistého, prachem nezaneseného, filtru. A tlakový spád byl také odečítán po každé dávce prachu. Poté došlo opět k vážení testovacího i absolutního filtru na laboratorních vahách. Toto se opakovalo do dosažení předem určeného konečného tlakového spádu. Hodnoty z jednotlivých měření jsou v příloze.

7.4 FILTRAČNÍ VLASTNOSTI

Je vhodné odlišovat parametry, které určují průběh filtrace a výsledné užité vlastnosti filtru. Veškeré parametry filtrace mohou být proměnnými, to znamená, že mění hodnoty filtračních vlastností. Vlastností textilních filtrů je více a uvádějí se podle potřeby použití. Vlastnosti se v průběhu procesu filtrace mění v důsledku zaplňování filtru zachycenými částicemi, což klade nároky na způsoby testování. [28]

7.4.1 EFEKTIVITA

Efektivita E , neboli odlučivost je daná vztahem:

$$E = \left(1 - \frac{G_1}{G_2}\right) \cdot 100 \text{ [%]}. \quad (3)$$

G_1 - množství prachu nezachyceného filtrem [g]

G_2 - celkové množství podaného prachu [g]

Střední efektivita pro více měření jednoho filtru:

$$E_c = \frac{1}{G_c - G_{2,1}} \cdot \left[\left(\frac{E_1 + E_2}{2} \right) \cdot G_{2,2} + \left(\frac{E_2 + E_3}{2} \right) \cdot G_{2,3} + \dots + \left(\frac{E_n + E_{n+1}}{2} \right) \cdot G_{2,n+1} \right] \text{ [%]} \quad (4)$$

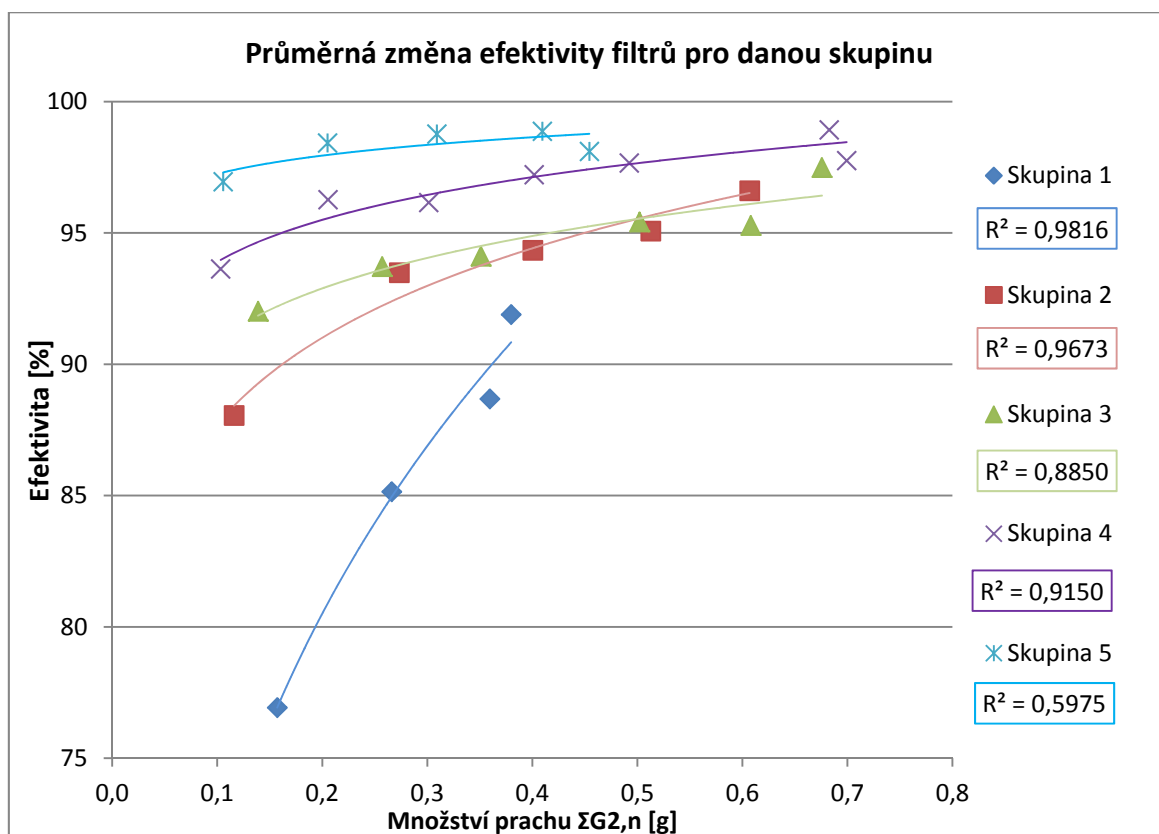
G_c - celkové množství prachu podaného během všech měření jednoho vzorku filtru [g]

$G_{2,n}$ - celkové množství prachu podaného během n-tého měření [g]

E_n - efektivita n-tého měření filtru [%]

Výsledná hodnota je obvykle o něco vyšší, než aritmetický průměr jednotlivých měření.

Pro hodnocení filtru je důležitý fakt, že v důsledku změny struktury filtru v průběhu procesu filtrace se hodnota efektivity mění. To je dáno tím, že částice zachycené na povrchu vlákna se samy stávají filtrem a zvyšují tak jeho činnou plochu.



Obr. 44 – Grafické porovnání průměrné efektivy jednotlivých skupin filtrů

Diskuze výsledků:

Graf na Obr. 44 znázorňuje závislost růstu efektivity na množství podaného prachu a zároveň potvrzuje předpoklad, že hodnota efektivity je závislá na plošné hmotnosti filtru. U některých vzorků filtrů je možné pozorovat náhlé klesnutí efektivity v průběhu měření (viz grafy v Příloze č. 7), což může být způsobeno manipulací se vzorky v průběhu měření od filtračního zařízení k vahám a zpět, kdy mohlo dojít ke sklepnutí části zachyceného prachu.

Jednotlivé hodnoty určitého filtru, či skupiny v grafech (viz. Příloha č. 6) jsou proloženy mocninnou spojnicí trendu, která vhodně vystihuje počáteční rychlý růst a

následnou stabilizaci efektivity v čase. Všechny spojnice jsou zároveň označeny hodnotou spolehlivosti R, která dosahuje rozmezí 0 až 1. Hodnoty blízké 1 znamenají dokonalé přizpůsobení křivky datům. Lze tedy vyvodit, že u filtrů 3.1 a 5.1 došlo k určitým chybám v měření či při manipulaci. Kdežto u filtrů 2.1 a 3.3 vývoj hodnot efektivity plně odpovídá modelovým předpokladům závislosti růstu efektivity na přidávaném testovacím prachu během filtrace.

7.4.2 TLAKOVÝ SPÁD

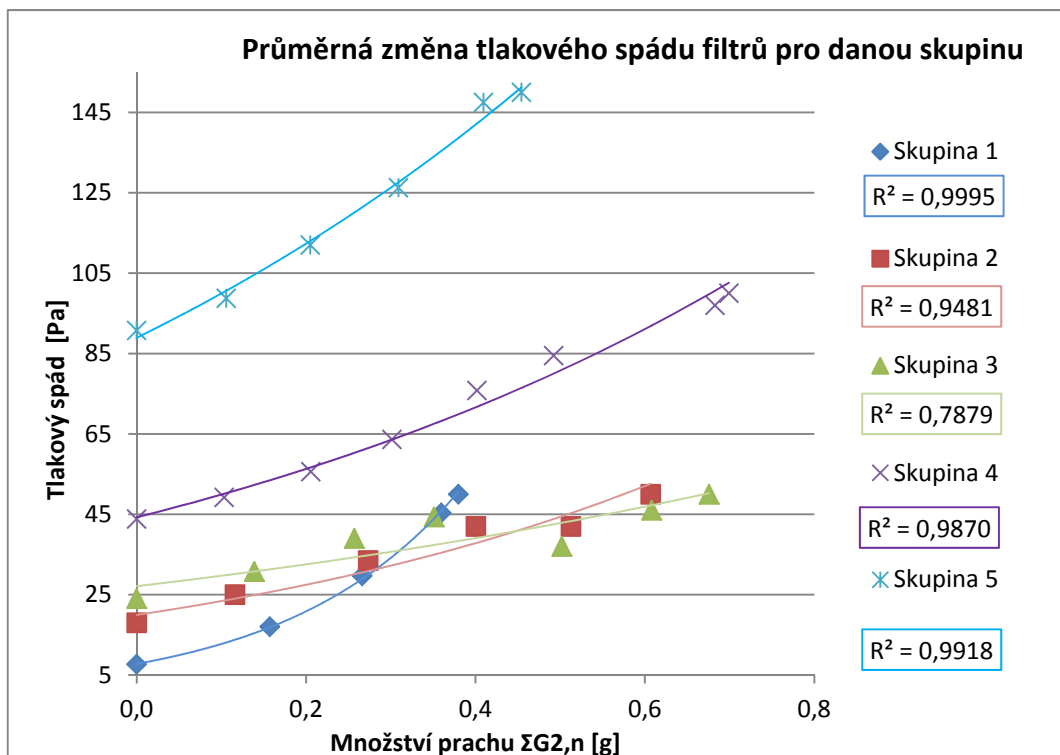
Tlakový spád, jež bývá někdy označován jako tlaková ztráta, určuje rovnice:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \text{ [Pa]} \quad (5)$$

p_1 - tlak před filtrem [Pa]

p_2 - tlak filtrovaného média za filtrem [Pa]

Vyjadřuje odpor vůči toku vzduchu skrz filtr. Pro seriózní hodnocení tlakového spádu je nutné uvést i rychlost toku vzduchu těsně před filtrem, neboť s jejím růstem roste i tlakový spád (většinou lineárně). Také hodnota tlakového spádu se v průběhu procesu filtrace mění v důsledku zaplňování mezivlákněných prostor zachycenými částicemi. Při hodnocení reálného filtru se proto uvádí pouze počáteční tlakový spád, kdy filtr ještě neobsahuje zachycené částice.



Obr. 45 – Grafické porovnání růstu průměrného tlakového spádu jednotlivých skupin vzorků filtru

Diskuze výsledků:

Z grafu na Obr. 45 lze vyčíst, že počáteční tlakový spád je tím vyšší, čím je vyšší plošná hmotnost filtru. Také to, že tlakový spád v průběhu filtrace s množstvím přidávaného prachu roste, což opět potvrzuje fakt, že prach zachycený na povrchu vláken se sám stává filtrem, a tím se zvyšuje odpor toku vzduchu skrz filtr (viz. Příloha č. 6). Dle znázorněných exponenciálních spojnic trendu v grafu lze očekávat další růst tlakového spádu při dalším podávání prachu. Hodnoty spolehlivosti R dokazují, že růst tlakového spádu je značně závislý na podávání prachu. Hodnota R u skupiny 3 je nejspíše ovlivněná vzorkem číslo 3.2 (viz. Příloha č. 8), u kterého došlo pravděpodobně při manipulaci ke sklepaní prachu, proto v průběhu procesu došlo k jednorázovému poklesu efektivity i tlakového spádu. Obtížně lze vysvětlit chování skupiny 1 s nejnižší plošnou hmotností. Počáteční tlakový spád je nižší, pak však dochází k prudkému růstu (obdobně i u efektivity). Možným vysvětlením je gradient hustoty, tedy vyšší hustota na náletové straně filtrů, kde dochází k tvorbě filtračního koláče (částice nepronikají dovnitř struktury filtru).

7.4.3 ŽIVOTNOST FILTRU

Životnost filtru je daná dobou, kdy je třeba filtr vyměnit. Z hlediska životnosti známe filtry jednorázové a filtry s čištěním. Pro jednorázové filtry je životnost ovlivněna koncentrací částic ve vzduchu a množstvím částic, které je schopen pojmout do chvíle, kdy je tlaková ztráta příliš vysoká. Životnost se definuje pomocí jímavosti, neboli množství prachu, které je filtr schopen zachytit do okamžiku dosažení zadaného tlakového spádu.

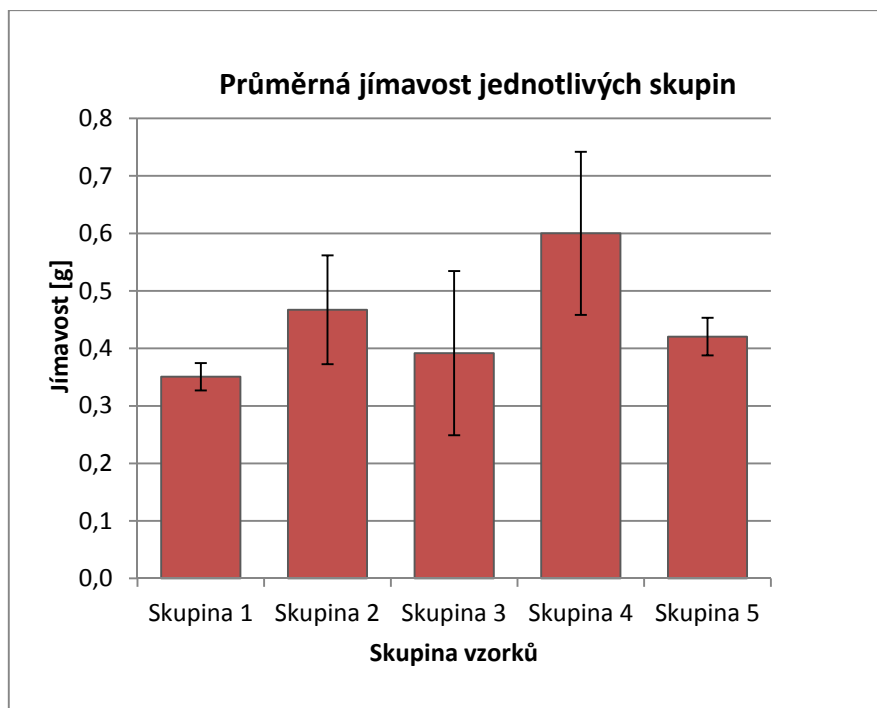
$$J = E_c \cdot G_c / 100 \text{ [g]} \quad (6)$$

J - jímavost filtru

E_c - střední hodnota efektivity [%]

G_c - celkové množství prachu podaného během všech měření jednoho vzorku filtru do okamžiku překročení mezního tlakového spádu [g]

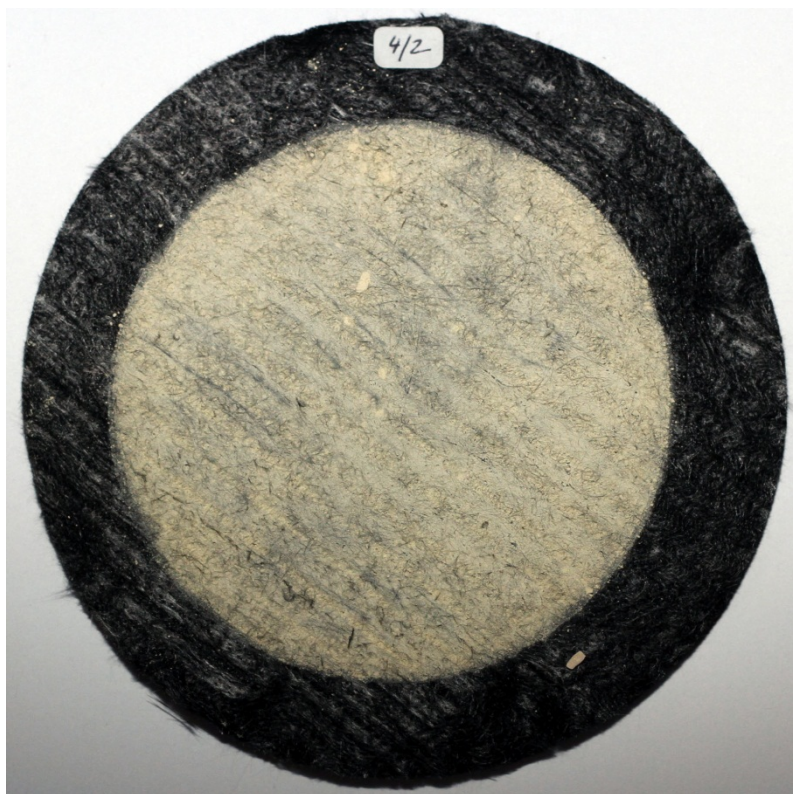
Pro filtry s čištěním je životnost dána délkou intervalu mezi čištěním a počtem čištění do okamžiku, kdy pevnost filtru neodpovídá požadavkům procesu filtrace.



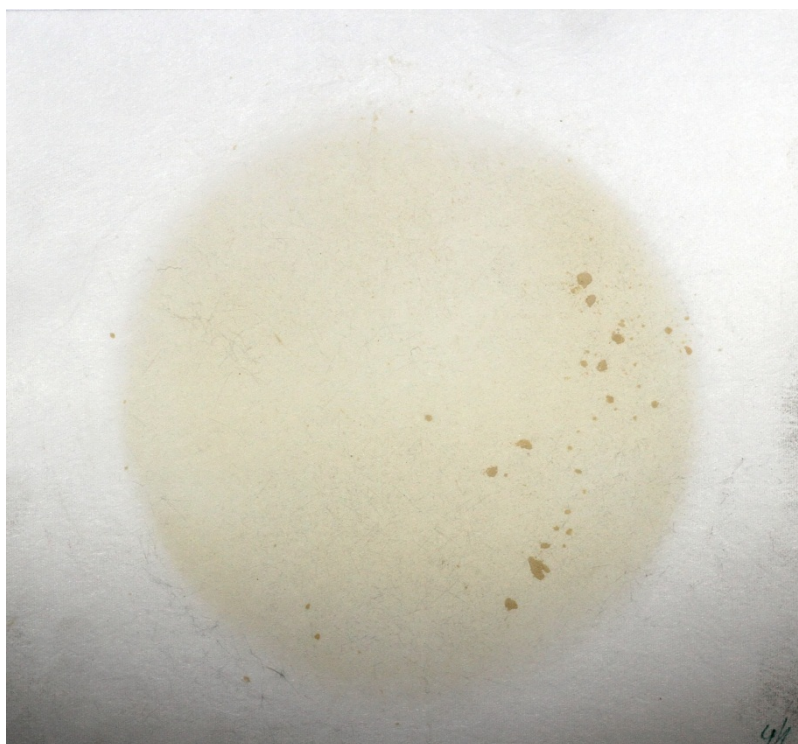
Obr. 46 – Grafické znázornění průměrné životnosti filtrů dle dané skupiny

Diskuze výsledků:

Z grafu na Obr. 46 lze konstatovat, že není potvrzen předpoklad závislosti filtrů na množství podaného prachu. Předpoklad totiž uvádí, že filtr s menší plošnou hmotností, tedy slabší filtr, bude mít delší životnost, z nutnosti aplikace více prachových částic k zaplnění mezivlákněných prostor. Lze říci, že prachové částice se nezachycují pouze na povrchu filtru (tím by došlo k jeho ucpání – zkrácení životnosti), nýbrž částice jsou zachycovány i uvnitř filtru. Tento jev však nemusí nastat, což vysvětlují nižší hodnoty u skupin 1 a 3. Hodnoty naměřené jímavosti jsou vztaženy k ploše $0,01\text{m}^2$.



Obr. 47 - Zachycený prach na testovacím uhlíkovém filtru



Obr. 48 - Prach zachycený na absolutním filtru

8 APLIKACE FILTRŮ Z RECYKLOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Jedním z úkolů této práce je navrhnout možnou aplikaci vyrobených filtrů z recyklovaných uhlíkových vláken. Jak již zde bylo zmíněno, celosvětový nárůst ve využívání kompozitních materiálů z uhlíkových vláken s sebou přináší i nutnost nalezení možného využití kompozitů po skončení jejich životnosti. Proces výroby uhlíkových vláken a následně i kompozitních materiálů z nich, je proces náročný a nákladný a bylo by nesmyslné likvidovat tyto materiály skládkováním nebo spalováním, když je již prokázáno, že si uhlíková vlákna zachovávají své vynikající vlastnosti i po použití vhodného typu recyklace. Zároveň je zbytečné recyklovat tyto materiály a následně nevyužít jejich stále výborných vlastností. Jednou z těchto vlastností je vynikající odolnost vůči vysokým teplotám.

Když se porozhlédneme po možném uplatnění filtrů z recyklovaných uhlíkových vláken pro filtraci za vysokých teplot, přímo se nabízí jedna z aplikací.

V současné době existuje poměrně velké množství způsobů vytápění rodinných domů či bytů. Jako zdroje energie pro vytápění těchto objektů lze použít především tuhá fosilní paliva (černé, hnědé uhlí, koks aj.), zemní plyn (alternativně propan či lehký topný olej), elektřinu (přímotopy, akumulární topení, tepelná čerpadla atd.) a samozřejmě také obnovitelné zdroje energie - biomasu (kusové dřevo, štěpka, pelety atd.), energii solární, geotermální, nebo lze uvedené zdroje různě kombinovat. Výběr konkrétního způsobu vytápění je pak ovlivněn mnoha faktory, například dostupností daného zdroje a výší investičních nákladů, individuálními preferencemi, tepelně - technickými vlastnostmi daného objektu, náročností na obsluhu. Ideálně by měly být zvažovány také výhody a nevýhody ekologické. [36]

Lokální topeniště jsou dominantním či jediným způsobem vytápění v malých obcích. Často v nich dochází k nedokonalému spalování paliv a ke spalování komunálního odpadu, což vede k vývinu karcinogenních a toxických látek a jejich vypouštění do ovzduší. U zdrojů v sítích dálkového vytápění jsou na rozdíl od lokálních topenišť ze zákona omezené a kontrolované emise do ovzduší, tyto emise jsou několikanásobně nižší než emise z odpovídajícího počtu lokálních topenišť (domovních kotlů ústředního topení, kamen, atd.). Spaliny z lokálních topenišť jsou situovány v husté občanské zástavbě, které mají nízké vyústění svých komínů nad okolní terén, a

tím dochází k pomalému rozptylu do vertikálních i horizontálních vrstev atmosféry. Podíl lokálních topenišť má značný vliv na celkové znečištění ovzduší. [37]

Vytápění pevnými fosilními palivy zaznamenává díky zvyšujícím se cenám elektřiny a zemního plynu v posledních letech svůj návrat. Výhodou využití těchto paliv je vysoká koncentrace energie v jednotce objemu, propracovanost a dlouhodobé ověření technologií jejich využití pro vytápění, snadná dostupnost a přijatelné ekonomické náklady. Podstatnou nevýhodou je (pomineme-li jejich neobnovitelnost, negativní dopady těžby na ekosystémy a krajinný ráz apod.) hlavně výrazná ekologická zátěž, kterou jejich spalování představuje pro ovzduší. Největší množství plynných emisí exhalovaných do atmosféry lidskou činností pochází právě ze spalování fosilních paliv. Vznikají spaliny obsahující oxidy síry, dusíku, uhlíku, tuhé částice včetně stopových prvků jako jsou těžké kovy, organické látky (uhlovodíky) a řadu dalších, které znečišťují ovzduší a mají i negativní důsledky na lidské zdraví. Využívání pevných fosilních paliv jako zdrojů energie pro vytápění se tedy rozhodně nedá zařadit mezi způsoby šetrné k prostředí, ačkoli s rozvojem moderních technologií spalovacích kotlů se jejich spalování zefektivňuje a do určité míry se reguluje i množství látek vypouštěných do ovzduší. [36]

Přímo se tedy vybízí možnost uplatnění filtrů z recyklovaných uhlíkových vláken, jako spalínové filtry pro lokální topeniště, umístěné mezi kotel a komín. Jak již bylo zmíněno, vysokým teplotám dlouhodobě odolávají pouze uhlíková a čedičová vlákna. Standardně se teploty spalin při vstupu do komína pohybují kolem 400 °C, krátkodobě mohou dosáhnout až 600 °C, za současného působení vodních par a plynných emisí. V těchto podmínkách, jiná vlákna než uhlíková nebo čedičová, budou poškozena nebo dokonce zničena.

Tabulka 14 ukazuje možnou variantu parametrů procesu spalování porovnanou s parametry typického filtru.

Tab. 14 – Úvaha reálné plochy filtru pro použití v systému

LOKÁLNÍ TOPENIŠTĚ		VYROBENÝ TESTOVANÝ FILTR	
Tlak spalin	1,5 [Pa]	Tlak	10 [Pa]
Rychlost proudění	2 [m/s]	Rychlost	0,075 [m/s]
Průřez o poloměru	0,05 [m]	Filtrační plocha	0,01 [m ²]

Při výpočtu poměru rychlostí, přepočtení tlakového spádu a porovnání, získáme koeficient na přepočet reálné plochy filtru. Reálná filtrační plocha pro použití v systému je cca 1,8 m². Toto lze realizovat pomocí skládaných kapsových filtrů.

Uplatnění recyklovaných uhlíkových vláken pro spalínové filtry v lokálních topeništích je tedy realizovatelné, nezbývá než doporučit další vývoj a výzkum této možné aplikace.

9 ZÁVĚR

Vývoj kompozitních materiálů a technologií jejich výroby je rychlý a postupuje stále kupředu. Avšak i tyto materiály mají omezenou životnost a vyvstává tedy otázka, jak nakládat s tímto odpadem. Touto problematikou se začínají intenzivněji zabývat světové laboratoře i laboratoř VZLÚ u nás. VZLÚ sestrojila experimentální zařízení na základě pyrolýzního procesu dekompozice pro recyklaci kompozitních materiálů s vláknovou výztuží a reaktoplastickou matricí, kterému předcházely široké rozborů a studie. Na tomto zařízení bylo provedeno nesčetně zkoušek dekompozice různých typů kompozitů. První výsledky prokázaly, že touto cestou lze získat skelnou, bórovou a uhlíkovou výztuž, naopak kevlarovou a aramidovou výztuž získat nelze, protože neodolává vysokým teplotám potřebným pro rozklad polymerní matrice.

V další fázi VZLÚ ve spolupráci s TUL testovala a porovnávala vlastnosti recyklované vláknové výztuže s původní. Tyto výsledky přinesly zjištění, že skleněná vlákna po tepelném rozkladu kompozitu výrazně ztratila na svých vlastnostech, naopak vlastnosti uhlíkových vláken se zhoršily jen nepatrně. Jejich výzkum nakonec vyústil v zaměření se na recyklaci uhlíkových vláken cestou termooxidačního rozkladu. Další výzkum VZLÚ směřuje k nalezení vhodné aplikace pro recyklovaná uhlíková vlákna.

Cílem této diplomové práce bylo ověřit jeden z možných směrů, kde lze nalézt potenciál pro uplatnění recyklovaných uhlíkových vláken s využitím jejich stále unikátních vlastností za poloviční náklady. Jinými slovy, cílem bylo zjistit, zda lze z těchto vláken nějakým způsobem vyrobit filtry s požadovanými vlastnostmi pro využití výrobku ve specifickém prostředí, dále testování funkčnosti těchto filtrů a nalezení pro ně vhodného uplatnění.

První fáze experimentu spočívala ve výrobě poloprovozních vzorků filtrů s proměnlivými parametry plošné hmotnosti s ohledem na zpracování staplových vláken a s ohledem na finální využití, tzn. výběr technologie výroby netkaných textilií odolné vysoké teplotě a chemické agresivitě a schopné zpracovat dodaná vlákna určitých délek. Jako vhodná technologie výroby vlákněné vrstvy byla zvolena technologie mykání a z mechanických technologií zpevnění byla zvolena technologie vpichování. Tímto způsobem bylo vyrobeno pět skupin vzorků s různou plošnou hmotností.

Druhá fáze experimentu představovala testování filtračních vlastností vyrobených vzorků filtrů a následné zpracování a vyhodnocení získaných dat. Testování probíhala

na dvou přístrojích, prvním byl Sodium Chloride Filter Test Flame Photometer, nebo-li test Aerosolem NaCl a druhým byl test na syntetický prach na přístroji Dust Filter Tester 3. Sledovanými filtračními vlastnostmi byly efektivita a tlakový spád u obou druhů testování a jímavost filtrů u testování na přístroji DFT 3.

- Růst efektivy je závislý na množství podaného prachu. Zároveň je potvrzen předpoklad, že hodnota efektivy je závislá na plošné hmotnosti filtru. Mocninná spojnice trendu proložená hodnotami vystihuje počáteční rychlý růst a následnou stabilizaci efektivy v čase.

- Velikost počátečního tlakového spádu je závislá na plošné hmotnosti filtru. Tlakový spád v průběhu filtrace s množstvím přidávaného prachu roste, tlakový spád je na něm tedy značně závislý. U filtrů skupiny 1 (vzorky s nejnižší plošnou hmotností) byl počáteční tlakový spád nižší, avšak pak docházelo k jeho rychlému růstu, což mohlo být způsobeno nepronikáním částic dovnitř do struktury filtru, ale vytvářením tzv. filtračního koláče.

- Nebyl potvrzen předpoklad závislosti životnosti filtrů na množství podaného prachu. Předpokladem je nutnost aplikace většího množství prachu k zaplnění mezivlákných prostor slabších filtrů, které mají menší plošnou hmotnost. Filtry skupiny 1 (s nejmenší plošnou hmotností) mají nejnižší hodnotu životnosti, což lze vysvětlit zachycováním částic pouze na povrchu filtru. Největší jímavost je možné pozorovat u filtrů skupiny 4, kde dochází k zachycování prachu nejen na povrchu, ale i k zachycování uvnitř filtru.

Všechny testované vzorky v podstatě odpovídají svými vlastnostmi kvalitním vzduchovým filtrům. U skupiny 1 se jedná o třídu G3, u ostatních jsou to třídy G4 až F7 dle normy EN 779.

Závěrečná část experimentu navrhla možný způsob využití vyrobených a funkčních vzorků filtrů, a to jako spalínové filtry pro lokální topeniště. Je zde nastíněn výpočet potřebné filtrační plochy pro účinnost filtrace, která činí cca $1,8\text{m}^2$, což lze realizovat ve formě skládaných kapsových filtrů.

Z výsledků této diplomové práce vyplývají důležité poznatky, které rozhodně stojí za případná další zkoumání. Ať už půjde o pokus vyrobit vláknennou vrstvu aerodynamickou nebo mechanicko-aerodynamickou technologií, která je podmíněna maximální délkou vláken 50 mm, nebo o pokus sestavení čistitelného skládaného filtru.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KOŘÍNEK, Z. *Definice, rozdělení a historie kompozitů*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>.
- [2] GRÉGR, J. *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Applikace/3.1_zaverecne_zpravy/%5B3.1.09%5D.pdf>.
- [3] TOMKOVÁ, Blanka. *Kompozity s textilní výztuží*. Přednášky z předmětu Kompozity s textilní výztuží. KTM TU v Liberci. 2008
- [4] KOŘÍNEK, Z. *Matrice pro kompozity*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <www.volny.cz/zkorinek/matrice.pdf>.
- [5] KŘENA, J. *Technologie výroby leteckých dílů z kompozitu na bázi uhlíkové vlákno a termoplastická matrice*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.csm-kompozity.wz.cz/RTLaplikace.pdf>>.
- [6] MUNZAROVÁ, P. *Uhlíkové kompozitní materiály s anorganickou maticí*. Liberec, 2008. Diplomová práce na TUL KTM. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Kovačič.
- [7] KOŘÍNEK, Z. *Vlákna pro kompozity*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>.
- [8] *Boeing 777*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Boeing_777>.
- [9] *Boeing 787*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <<http://iho.hu/hir/alomgep-atadas-amitol-mas-a-boeing-787-ese-110925>>.
- [10] *Airbus A 350*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <www.siwep.net/haber/1941-havacilik-airbus-amp-boeing-rekabeti-siwep-ozel.html>.
- [11] *Airbus A380 obrázek*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <www.airporttech.tc.faa.gov/Safety/Patterson2.asp>.
- [12] *Airbus A 350 obrázek*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <<http://blog.daum.net/kwtace/1128>>.
- [13] HRŮŽA, J. *Zpracování odpadů textilních a polymerních 1-2*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=zpracov%C3%A1n%C3%AD%20odpad%C5%AF%20textiln%C3%ADch%20a%20polymern%C3%ADch&source=web&cd=1&ved=0CCwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ft.vslib.cz%2Fdepart%2Fknt%2Fweb%2Findex.php%3Foption%3Dcom_docman%26task%3Ddoc_download%26gid%3D88%26Itemid%3D36&ei=3RPIToOcCc2M4gSm4-SRBQ&usq=AFQjCNF2ZeTczTdDz77h87Q9H66mntDF6Q&cad=rja>.
- [14] VALEŠ, M. *Experimenty pyrolyzního rozkladu při recyklaci kompozitních materiálů s termosetickou maticí*, TRANSFER, duben 2007, roč. 2, č.3, s. 19-28.
- [15] MAŠEK, Z., ŠTEKNER, B., CIHELNÍK, K. *Popis recyklačního procesu tepelného rozkladu významných termosetických polymerních kompozitních matic, teplotní oxidační rozklad vyvíjený ve VZLÚ, a.s.*, TRANSFER, duben 2009, roč. 4, č.9, s. 21-32.
- [16] JIRSÁK, O., KALINOVÁ, K. *Netkané textilie*. Skriptum. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/nte/tisk.pdf>.
- [17] *Norma: Textilie. Netkané textilie. Definice. ČSN EN 29092 (800002)*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <<http://shop.normy.biz/d.php?k=16339>>.
- [18] *Mykací stroj*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.vuts.cz/cze/VVO_automatizovana_pradelna.html>.

- [19] LIZÁK, P., LIGAS, J. *Základy textilnej a odevnej výroby*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <www.kpd.tnuni.sk/images/skripta2.pdf>.
- [20] *Stroje a zařízení*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <www.kvm.tul.cz/studenti/texty/uvod_do_strojirenstvi/kap7.pdf>.
- [21] *Textilní vlákna*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/chemicka_vlakna.pdf>.
- [22] *Uhlíkové vlákno*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno>.
- [23] VALEŠ, M., CIHELNÍK, K., ŠTEKNER, B. *Recyklace kompozitních materiálů s uhlíkovou výztuží, získané recykláty a jejich aplikace*. TRANSFER, duben 2008, roč. 3, č. 7, s. 45-10.
- [24] *Boeing 787*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Boeing_787>.
- [25] *Airbus A 380*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Airbus_A380>.
- [26] CIHELNÍK, K. *Vlastnosti recyklovaných uhlíkových vláken, jejich možné aplikace a vlastnosti nově vzniklých materiálů*. Dokumentační zpráva R4449 VZLÚ a.s., Praha, 2008.
- [27] HRŮZA, J. *Zlepšení vlastností vlákenných filtrů určených pro suchou filtraci*. Liberec. Doktorská práce na TUL KNT.
- [28] HRŮZA, J. *Filtrace*. Přednášky z předmětu Textilie pro průmyslové aplikace. KNT TU v Liberci. 2008
- [29] HRŮZA, J. *Zpracování odpadů textilních a polymerních 3-4*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=zpracov%C3%A1n%C3%AD%20odpad%C5%AF%20textiln%C3%ADch%20a%20polymern%C3%ADch&source=web&cd=2&ved=0CDIQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.ft.vslib.cz%2Fdepart%2Fknt%2Fweb%2Findex.php%3Foption%3Dcom_docman%26task%3Ddoc_download%26gid%3D89%26Itemid%3D36&ei=3RPIToOcCc2M4gSm4-SRBQ&usq=AFQjCNE5f0dTdVYQAYabhmil6ldzOut4oA&cad=rja>.
- [30] MAŠEK, Z., ŠTEKNER, B., CIHELNÍK, K. *Uhlíkové vlákno jako produkt recyklace*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=6570&mark>.
- [31] *Technologie vpichování*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vpichov%C3%A1n%C3%AD_%28textil%29>.
- [32] BROWN, R. C. *Air filtration*. 1st edition. Pergamon Press, Oxford, UK, 1993. ISBN 0 08 041274 2
- [33] WAKEMAN R. J., TARLETON, E.S. *Filtration. Elsevier Avanced Technology*, Oxford, UK, 1999, ISBN: 1856173453
- [34] PRŮCHA, P., ŘEHÁK, M. *Porovnání technologií výroby vytvrzovacích přípravků z kompozitních materiálů*. TRANSFER, březen 2011, roč. 6, č. 14, s. 5-10.
- [35] PRŮCHA, P. *Aplikace kompozitních materiál v konstrukci malého dopravního letadla*. TRANSFER, duben 2008, roč. 3, č. 7, s. 40-44.
- [36] BIČANOVSKÁ, D. *Možnosti vytápění*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <<http://arnika.org/moznosti-vytapeni>>.
- [37] *Lokální topeniště*. [online]. [cit. 11. 12 2011]. Dostupné na World Wide Web: <www.lokalni-topeniste.cz/index.php?menu=cvz>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 - Schéma výroby uhlíkových vláken z PAN prekurzoru a znázornění změny struktury PAN vlákna [6]
- Obr. 2 - Rozsah mechanických vlastností vláken z polymerních prekurzorů [3]
- Obr. 3 - Dopravní letadlo Boeing 777 – použití materiálů [9]
- Obr. 4 - Boeing 787 Dreamliner – materiálové složení [10]
- Obr. 5 - Airbus 380 – materiálové složení [11]
- Obr. 6 - Airbus A350 XWB – materiálové rozložení [12]
- Obr. 7 - Experimentální systém pro teplotní (pyrolýzní) rozklad vláknových termosetických kompozitních materiálů
- Obr. 8 - Vzorky kompozitů vypálené při různých teplotách
- Obr. 9 - Vzorek kompozitu uhlík-epoxid před a po teplotním rozkladu [14]
- Obr. 10 - Vzorek kompozitové desky uhlík-epoxid před zpracováním (dole) a vyseparovaná vláknová výztuž po zpracování (nahore) [14]
- Obr. 11 - Vláknová výztuž po recyklaci [14]
- Obr. 12 – Grafické zobrazení průměrů recyklovaných uhlíkových vláken v závislosti na teplotě recyklace [26]
- Obr. 13 – Grafické znázornění porovnání měrných hmotností naměřených na recyklovaných uhlíkových vláknech v destilované vodě a v izopropylalkoholu [26]
- Obr. 14 – Grafické znázornění porovnání jemností svazků recyklovaných uhlíkových vláken [26]
- Obr. 15 – Grafické znázornění pevnosti v tahu recyklovaných uhlíkových vláken [26]
- Obr. 16 – Graficky znázorněné moduly pružnosti recyklovaných uhlíkových vláken [26]
- Obr. 17 – Graficky znázorněné tažnosti recyklovaných uhlíkových vláken [26]
- Obr. 18 - Prachové úlomky recyklovaných uhlíkových vláken [26]
- Obr. 19 - Škodlivost prachových úlomků recyklovaných uhlíkových vláken [26]
- Obr. 20 - Válcový mykací stroj [18]
- Obr. 21 – Schéma válcového mykacího stroje
- Obr. 22 - Drátkové mykací povlaky [19]
- Obr. 23 - Poloha na mykání – Poloha na snímání – Poloha na povyčesávání [16]
- Obr. 24 - Horizontální příčný kladeč pavučiny [16]
- Obr. 25 - Zařízení pro aerodynamickou tvorbu rouna [16]
- Obr. 26 - Rounotvořič K 21 firmy Fehrer [16]
- Obr. 27 - Schéma vpichovacího stroje [16]
- Obr. 28 - Vpichovací jehla [16]
- Obr. 29 - Schematické znázornění hloubky vpichu [16]
- Obr. 30 - Grafické znázornění četnosti průměru vláken
- Obr. 31 – Detail recyklovaných uhlíkových vláken pod mikroskopem z obrazové analýzy
- Obr. 32 - Vyrobený vzorek filtru se znatelným vpichováním
- Obr. 33 – Grafické znázornění porovnání průměrné tloušťky vzorků filtrů dle dané skupiny
- Obr. 34 – Grafické znázornění průměrné váhy filtrů dané skupiny
- Obr. 35 – Grafické porovnání průměrné plošné hmotnosti filtrů daných skupin
- Obr. 36 - Vyřazený vzorek se značnou nestejnomořností
- Obr. 37 - Příklady filtrovaných částic, jejich velikosti a typy filtrace. [27]
- Obr. 38 - Schéma principu přístroje pro testování aerosolem NaCl [27]
- Obr. 39 - Grafické znázornění průměrného tlakového spádu jednotlivých skupin
- Obr. 40 – Grafické znázornění průměrné efektivity jednotlivých skupin

- Obr. 41 – Grafické znázornění vztahu mezi efektivitou a tlakovým spádem vzorků filtrů jednotlivých skupin
- Obr. 42 – Přístroj DFT-3 [27]
- Obr. 43 - Schéma měřícího zařízení Dust Filter Tester DFT-3 [27]
- Obr. 44 – Grafické porovnání průměrné efektivity jednotlivých skupin filtrů
- Obr. 45 – Grafické porovnání růstu průměrného tlakového spádu jednotlivých skupin vzorků filtru
- Obr. 46 – Grafické znázornění průměrné životnosti filtrů dle dané skupiny
- Obr. 47 - Zachycený prach na testovacím uhlíkovém filtru
- Obr. 48 - Prach zachycený na absolutním filtru
- Obr. 49 – Výstup z měření - Test na aerosol NaCl
- Obr. 50 – Grafické znázornění průměrné tloušťky vzorků filtrů Skupiny 1
- Obr. 51 – Grafické znázornění průměrné tloušťky vzorků filtrů Skupiny 2
- Obr. 52 – Grafické znázornění průměrné tloušťky vzorků filtrů Skupiny 3
- Obr. 53 – Grafické znázornění průměrné tloušťky vzorků filtrů Skupiny 4
- Obr. 54 – Grafické znázornění průměrné tloušťky vzorků filtrů Skupiny 5
- Obr. 55 – Histogram četností průměrů vláken
- Obr. 56 – Grafické vyjádření změny efektivity v průběhu filtrace – Skupina vzorků 1
- Obr. 57 – Grafické vyjádření změny efektivity v průběhu filtrace – Skupina vzorků 2
- Obr. 58 – Grafické vyjádření změny efektivity v průběhu filtrace – Skupina vzorků 3
- Obr. 59 – Grafické vyjádření změny efektivity v průběhu filtrace – Skupina vzorků 4
- Obr. 60 – Grafické vyjádření změny efektivity v průběhu filtrace – Skupina vzorků 5
- Obr. 61 – Grafické vyjádření změny tlakového spádu filtru v průběhu filtračního procesu – Skupina vzorků 1
- Obr. 62 – Grafické vyjádření změny tlakového spádu filtru v průběhu filtračního procesu – Skupina vzorků 2
- Obr. 63 – Grafické vyjádření změny tlakového spádu filtru v průběhu filtračního procesu – Skupina vzorků 3
- Obr. 64 – Grafické vyjádření změny tlakového spádu filtru v průběhu filtračního procesu – Skupina vzorků 4
- Obr. 65 – Grafické vyjádření změny tlakového spádu filtru v průběhu filtračního procesu – Skupina vzorků 5

SEZNAM TABULEK

- Tab. 1 – Vlastnosti uhlíkových vláken
- Tab. 2 - Vysokomodulová uhlíková PAN vlákna [7]
- Tab. 3 - Vlastnosti uhlíkových vláken z PAN při teplotě 20 °C [7]
- Tab. 4 - Rozmezí hodnot mechanických vlastností uhlíkových vláken [7]
- Tab. 5 - Mezinárodní zkratky používané pro výrobní technologie kompozitů [4]
- Tab. 6 – Klasifikace NT podle technologie výroby [16]
- Tab. 7 – Klasifikace NT podle způsobu zpevnění [16]
- Tab. 8 – Souhrn parametrů vyrobených vzorků filtrů
- Tab. 9 – Hodnoty pro vpichování a pro výpočet počtu vpichů na jednotku plochy
- Tab. 10 - Parametry tloušťkoměru
- Tab. 11 – Velikost částic jednotlivých metod testování
- Tab. 12 - Koncentrace částic jednotlivých metod testování
- Tab. 13 - Náletová rychlost částic jednotlivých metod testování
- Tab. 14 – Úvaha reálné plochy filtru pro použití v systému
- Tab. 15 - Vlastnosti vysokomodulových uhlíkových vláken z mezofázové smoly vyrobená firmou Nippon Graphite Fiber Corporation (vlákna Granoc®) [7]
- Tab. 16 - Vlastnosti vysokomodulových uhlíkových vláken Dialed® vyrobených z uhelné mezofázové smoly firmou Mitsubishi Chemical Corporation [7]
- Tab. 17 - Porovnání vlastností uhlíkových vláken ze dvou syntetických polymerních prekurzorů [7]
- Tab. 18 – Tabulka hodnot pro test aerosolem NaCl
- Tab. 19-1 – Tabulka hodnot - naměřené tloušťky filtrů
- Tab. 19-2 – Tabulka hodnot - naměřené tloušťky filtrů
- Tab. 20 – Hodnoty pro výpočet četnosti průměrů vláken
- Tab. 21 – Vypočítané hodnoty z četnosti průměrů vláken
- Tab. 22 – Hodnoty pro výpočet plošné hmotnosti
- Tab. 23-1 – Tabulka hodnot pro výpočet efektivity, tlakového spádu, jímavosti
- Tab. 23-2 – Tabulka hodnot pro výpočet efektivity, tlakového spádu, jímavosti
- Tab. 23-3 – Tabulka hodnot pro výpočet efektivity, tlakového spádu, jímavosti
- Tab. 23-4 – Tabulka hodnot pro výpočet efektivity, tlakového spádu, jímavosti
- Tab. 23-5 – Tabulka hodnot pro výpočet efektivity, tlakového spádu, jímavosti

SEZNAM ROVNIC

- (1) Rovnice pro výpočet počtu vpichů na jednotku plochy
- (2) Rovnice pro výpočet efektivity – test aerosolem NaCl
- (3) Rovnice pro výpočet efektivity – test na DFT 3
- (4) Rovnice pro výpočet střední efektivity více měření
- (5) Rovnice pro výpočet tlakového spádu
- (6) Rovnice pro výpočet jímavosti

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA č. 1

VLASTNOSTI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

PŘÍLOHA č. 2

SODIUM CHLORIDE FILTER TEST FLAME – výstup hodnot, tabulka

PŘÍLOHA č. 3

TLOUŠŤKA FILTRU – hodnoty, grafy

PŘÍLOHA č. 4

PRŮMĚR VLÁKEN – hodnoty, histogram

PŘÍLOHA č. 5

PLOŠNÁ HMOTNOST – tabulka hodnot

PŘÍLOHA č. 6

EFEKTIVITA, TLAKOVÝ SPÁD, JÍMAVOST – tabulky hodnot

PŘÍLOHA č. 7

DFT-3 EFEKTIVITA – grafy

PŘÍLOHA č. 8

DFT-3 TLAKOVÝ SPÁD - grafy

PŘÍLOHA č. 1
VLASTNOSTI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Tab. 15 - Vlastnosti vysokomodulových uhlíkových vláken z mezofázové smoly vyrobená firmou Nippon Graphite Fiber Corporation (vlákna Granoc®) [7]

		HM série			UHM série		
Uhlíkové vlákno		YSH-50A	YSH-60A	YSH-70A	YSH-80A	YSH-90A	YSH-95A
Průměr [μm]		7	7	7	7	7	7
Hustota [g/m ³]		2,1	2,12	2,14	2,17	2,18	2,19
Modul pružnosti E [GPa]	Osový	520	630	720	785	880	900
Pevnost v tahu [GPa]		3,9	3,9	3,63	3,63	3,53	3,53
Tažnost [%]		0,7	0,6	0,5	0,5	0,3	0,3
		HM série			Nízký modul, vysoké prodloužení		
Uhlíkové vlákno		CN-60	CN-80	CN-90	XN-05	XN-10	XN-15
Průměr [μm]		10	10	10	10	10	10
Hustota [g/m ³]		2,12	2,17	2,19	1,65	1,70	1,85
Modul pružnosti E [GPa]	Osový	620	780	860	51	110	155
Pevnost v tahu [GPa]		3,43	3,43	3,43	1,1	1,7	2,4
Tažnost [%]		0,6	0,5	0,4	2,0	1,6	1,5

Tab. 16 - Vlastnosti vysokomodulových uhlíkových vláken Dialed® vyrobených z uhelné mezofázové smoly firmou Mitsubishi Chemical Corporation [7]

Uhlíkové vlákno		Průmyslová		Letecká	
		K13710	13A10	KS352U	K13C2U
Průměr [μm]		10	10	10	10
Hustota [g/m ³]		2,12	2,15	2,05	2,19
Modul pružnosti E [GPa]	Osový	640	790	550	900
Pevnost v tahu [GPa]		2,6	2,6	3,6	3,8
Tažnost [%]		0,42	0,36	0,65	0,42
Součinitel délkové tepelné roztažnosti [10 ⁻⁶ /K]	Osový	-0,9	-1,5	--	--
	Příčný	10	6	--	--
Tepelná vodivost [W/mK]		140	220	130	620
Obsah uhlíku [% hmotnostní]		> 99	> 99	> 99	> 99

Tab. 17 - Porovnání vlastností uhlíkových vláken ze dvou syntetických polymerních prekurzorů [7]

Uhlíkové vlákno		Novoloid (Kynol®)		PAN	
Teplota zpracování [°C]		800	2000	1500	2000
Hustota [g/m ³]		1,5	1,4	1,8 – 1,9	1,9 – 2,0
Obsah uhlíku [% hmotnostní]		95	99,8	93	99,5
Pevnost v tahu [MPa]		500 - 700	400 - 600	1500 - 3000	1500 - 3000
Tažnost [%]		2,0 – 3,0	1,5 – 2,5	1,0 – 1,5	1,0 – 1,5
Modul pružnosti E [GPa]	Osový	200 - 300	150 - 200	150 - 300	150 - 300
Teplota počátku ztráty hmotnosti na vzduchu [°C]		476	573	560	560
Tepelná odolnost, ztráty hmotnosti na vzduchu[°C]	350°C vzduch	0	0	0	0
	400°C vzduch	2,8	2,2	2,4	2,4
Chemická afinita k epoxydovým pryskyřicím		Dobrá		Horší	

PŘÍLOHA č. 2

SODIUM CHLORIDE FILTER TEST FLAME – výstup hodnot, tabulka

<p>11</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003432 Penetration 99.0% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 80 Pa Date: 28/07/11 09.36</p>	<p>13</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003438 Penetration 94.6% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 09 Pa Date: 28/07/11 09.57</p>	<p>14</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003444 Penetration 90.1% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 11 Pa Date: 28/07/11 10.13</p>
<p>21</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003433 Penetration 100.0% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 2 Pa Date: 28/07/11 09.45</p>	<p>32</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003439 Penetration 99.1% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 04 Pa Date: 28/07/11 09.59</p>	<p>47</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003445 Penetration 74.4% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 26 Pa Date: 28/07/11 10.15</p>
<p>51</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003434 Penetration 99.3% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 00 Pa Date: 28/07/11 09.47</p>	<p>33</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003440 Penetration 92.9% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 12 Pa Date: 28/07/11 10.01</p>	<p>45</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003446 Penetration 76.0% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 30 Pa Date: 28/07/11 10.16</p>
<p>42</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003435 Penetration 100.0% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 00 Pa Date: 28/07/11 09.48</p>	<p>34</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003441 Penetration 94.8% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 11 Pa Date: 28/07/11 10.05</p>	<p>55</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003447 Penetration 62.2% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 35 Pa Date: 28/07/11 10.18</p>
<p>27</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003436 Penetration 95.8% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 04 Pa Date: 28/07/11 09.51</p>	<p>41</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003442 Penetration 84.6% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 5 Pa Date: 28/07/11 10.09</p>	<p>52</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003448 Penetration 59.2% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 50 Pa Date: 28/07/11 10.19</p>
<p>22</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003437 Penetration 98.2% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 00 Pa Date: 28/07/11 09.52</p>	<p>42</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003443 Penetration 85.1% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 13 Pa Date: 28/07/11 10.11</p>	<p>53</p> <p>TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</p> <p>Part No. 00000000 Serial No. 003449 Penetration 60.2% Flow 050 l/min Face Vel. 05.00 m/min Pressure 54 Pa Date: 28/07/11 10.24</p>

Obr. 49 – Výstup z měření - Test na aerosol NaCl

Tab. 18 – Tabulka hodnot pro test aerosolem NaCl

Vzorek	Průtok [l/min]	Rychlost [m/min]	Penetrace [%]	Tlakový spád [Pa]	Efektivita [%] = 100 - penetrace	Faktor kvality = E/tlakový spád	Průměr. E [%]	S ²	S	95% IS	95% IS _N	95% IS _p	Průměr. Tlakový spád [Pa]	S ²	S	95% IS	95% IS _N	95% IS _p
1.1	50	5	99,0	3	1,0	0,333	0,43	0,19	0,44	0,43	0,85	0,00	2,50	0,25	0,50	0,49	2,99	2,01
1.2	50	5	100,0	2	0,0	0,000												
1.3	50	5	99,3	2	0,7	0,350												
1.4	50	5	100,0	3	0,0	0,000												
2.1	50	5	95,8	7	4,2	0,600	3,00	1,44	1,20	1,66	4,66	1,34	5,00	4,00	2,00	2,77	7,77	2,23
2.2	50	5	98,2	3	1,8	0,600												
3.1	50	5	94,4	12	5,6	0,467	4,70	5,31	2,31	2,26	6,96	2,44	12,00	9,50	3,08	3,02	15,02	8,98
3.2	50	5	99,1	7	0,9	0,129												
3.3	50	5	92,9	15	7,1	0,473												
3.4	50	5	94,8	14	5,2	0,371												
4.1	50	5	84,6	18	15,4	0,856	17,96	35,15	5,93	5,20	23,16	12,76	22,00	57,20	7,56	6,63	28,63	15,37
4.2	50	5	85,1	16	14,9	0,931												
4.3	50	5	90,1	14	9,9	0,707												
4.4	50	5	74,4	29	25,6	0,883												
4.5	50	5	76,0	33	24,0	0,727												
5.1	50	5	62,2	38	37,8	0,995	38,88	2,22	1,49	1,46	40,33	37,42	49,50	50,25	7,09	6,95	56,45	42,55
5.2	50	5	59,2	53	40,8	0,770												
5.3	50	5	60,2	57	39,8	0,698												
5.4	50	5	62,9	50	37,1	0,742												

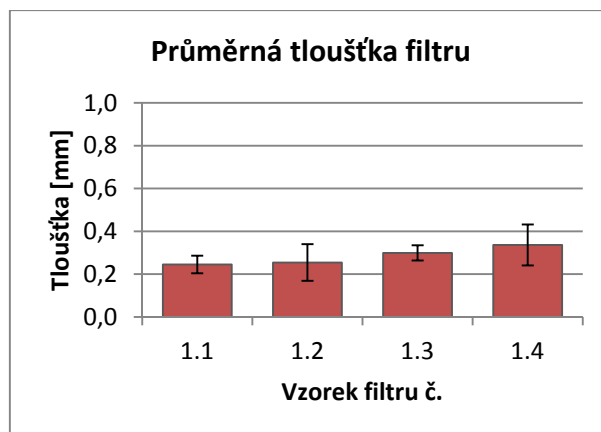
PŘÍLOHA č. 3
TLOUŠŤKA FILTRU – hodnoty, grafy

Tab. 19-1 – Tabulka hodnot - naměřené tloušťky filtrů

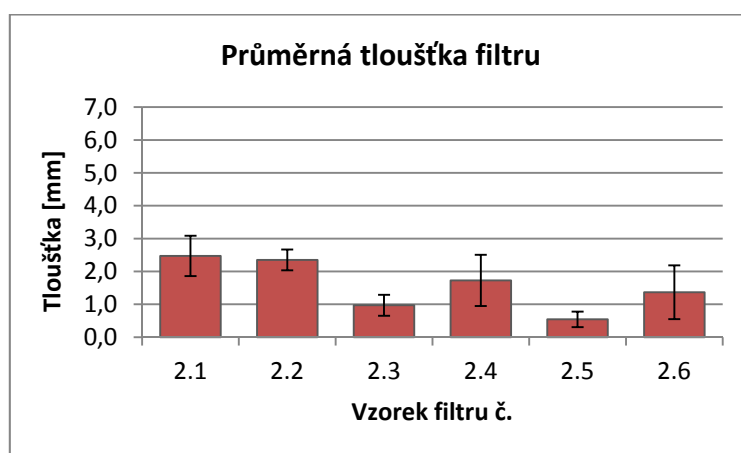
VZOREK č.	n	měření č.1	měření č.2	měření č.3	měření č.4	měření č.5	PRUMER tloušťky [mm]			PRUMER tloušťky [mm]			S	S ²	95% IS	95% IS _H	95% IS _b	
1.1	5	0,325	0,220	0,210	0,230	0,240	0,245	0,0017	0,0412	0,0361	0,2811	0,2058	0,2835	0,0062	0,0788	0,0345	0,3180	0,2490
1.2	5	0,200	0,240	0,230	0,180	0,420	0,254	0,0073	0,0857	0,0751	0,3291	0,1789						
1.3	5	0,325	0,240	0,280	0,340	0,310	0,299	0,0013	0,0356	0,0312	0,3302	0,2678						
1.4	5	0,220	0,280	0,440	0,460	0,280	0,336	0,0092	0,0958	0,0840	0,4200	0,2520						
2.1	5	2,200	3,120	2,150	1,640	3,240	2,470	0,3759	0,6131	0,5374	3,0074	1,9328	1,5710	0,8021	0,8956	0,3205	1,8915	1,2505
2.2	5	2,500	2,540	2,720	2,150	1,840	2,350	0,0991	0,3148	0,2760	2,6260	2,0740						
2.3	5	1,350	1,290	0,480	0,840	0,890	0,970	0,1020	0,3194	0,2800	1,2500	0,6900						
2.4	5	2,460	2,040	2,490	1,130	0,520	1,728	0,6061	0,7785	0,6824	2,4104	1,0456						
2.5	5	0,920	0,540	0,240	0,650	0,360	0,542	0,0558	0,2362	0,2070	0,7490	0,3350						
2.6	5	2,240	2,340	1,320	0,570	0,360	1,366	0,6721	0,8198	0,7186	2,0846	0,6474						
3.1	5	3,250	3,010	2,720	2,810	2,820	2,922	0,0358	0,1893	0,1659	3,0879	2,7561	2,4785	0,1892	0,4349	0,1348	2,6133	2,3437
3.2	5	2,290	2,390	2,490	1,040	2,600	2,178	0,3404	0,5834	0,5114	2,6894	1,6666						
3.3	5	2,680	2,690	2,470	2,940	2,510	2,658	0,0277	0,1663	0,1458	2,8038	2,5122						
3.4	5	2,520	2,760	3,090	2,430	2,640	2,688	0,0528	0,2297	0,2014	2,8894	2,4866						
3.5	5	2,440	2,290	2,210	2,640	1,760	2,268	0,0860	0,2932	0,2570	2,5250	2,0110						
3.6	5	2,950	2,120	3,060	1,990	3,310	2,686	0,2807	0,5299	0,4644	3,1504	2,2218						
3.7	5	2,300	2,230	2,140	1,610	2,190	2,094	0,0613	0,2476	0,2170	2,3110	1,8770						
3.8	5	2,480	2,220	2,330	2,400	2,240	2,334	0,0095	0,0975	0,0855	2,4195	2,2485						

Tab. 19-2 – Tabulka hodnot - naměřené tloušťky filtrů

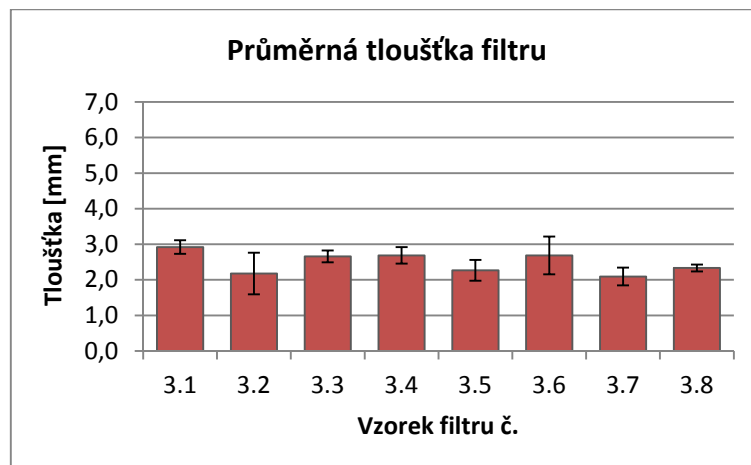
VZOREK č.	n	měření č.1	měření č.2	měření č.3	měření č.4	měření č.5	PRŮMĚR tloušťky [mm]	S^2	S	95% IS	95% IS _H	95% IS _D
4.1	5	4,760	5,050	4,870	5,020	4,980	4,936	0,0115	0,1071	0,0938	5,0298	4,8422
4.2	5	3,470	3,180	3,670	3,710	3,810	3,568	0,0499	0,2233	0,1957	3,7637	3,3723
4.3	5	4,050	3,650	3,310	4,130	4,020	3,832	0,0955	0,3090	0,2708	4,1028	3,5612
4.4	5	5,120	4,420	5,570	5,020	4,620	4,950	0,1616	0,4020	0,3524	5,3024	4,5976
4.5	5	5,010	4,520	4,120	4,530	4,170	4,470	0,1020	0,3194	0,2800	4,7500	4,1900
4.6	5	3,870	4,740	5,880	4,670	5,820	4,996	0,5800	0,7616	0,6676	5,6636	4,3284
4.7	5	5,170	4,670	4,110	3,720	3,920	4,318	0,2818	0,5309	0,4653	4,7833	3,8527
4.8	5	3,940	3,920	3,510	3,270	2,640	3,456	0,2306	0,4802	0,4209	3,8769	3,0351
5.1	5	4,330	4,820	4,860	4,750	5,090	4,770	0,0614	0,2478	0,2172	4,9872	4,5528
5.2	5	5,320	4,820	4,580	5,280	5,640	5,128	0,1435	0,3788	0,3320	5,4600	4,7960
5.3	5	4,690	5,480	5,690	5,670	5,020	5,310	0,1543	0,3928	0,3443	5,6543	4,9657
5.4	5	4,120	5,250	6,120	6,030	6,190	5,542	0,6199	0,7873	0,6901	6,2321	4,8519
5.5	5	5,120	5,970	6,130	6,420	6,460	6,020	0,2356	0,4854	0,4255	6,4455	5,5945
5.6	5	5,250	4,540	4,870	4,740	6,420	5,164	0,4481	0,6694	0,5867	5,7507	4,5773
5.7	5	5,210	4,980	5,420	5,240	5,050	5,180	0,0238	0,1543	0,1352	5,3152	5,0448
5.8	5	4,840	4,790	4,990	4,620	5,320	4,912	0,0556	0,2357	0,2066	5,1186	4,7054
							5,2533	0,3495	0,5911	0,1832	5,4364	5,0703



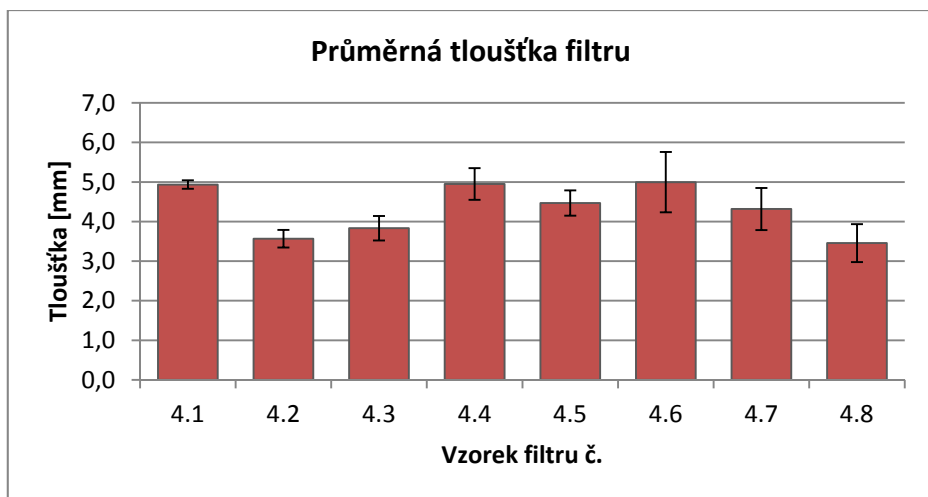
Obr. 50 – Grafické znázornění průměrné tloušťky vzorků filtrů Skupiny 1



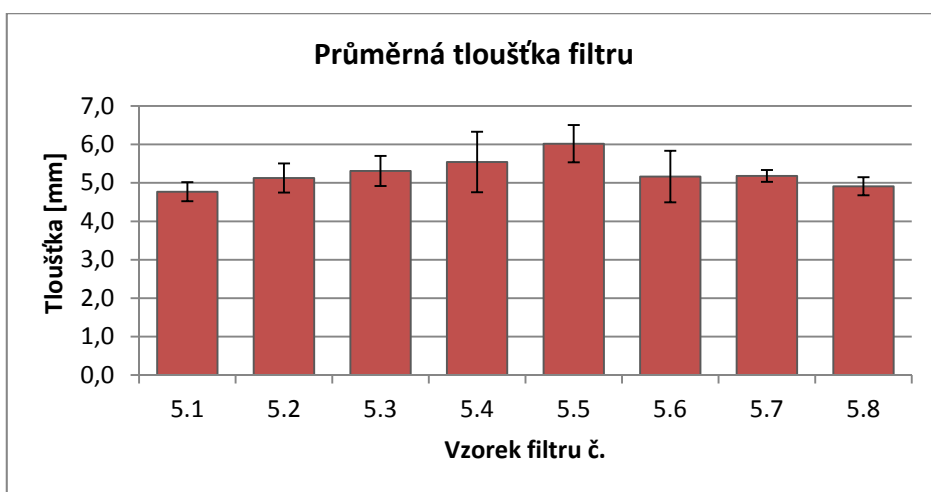
Obr. 51 – Grafické znázornění průměrné tloušťky vzorků filtrů Skupiny 2



Obr. 52 – Grafické znázornění průměrné tloušťky vzorků filtrů Skupiny 3



Obr. 53 – Grafické znázornění průměrné tloušťky vzorků filtrů Skupiny 4



Obr. 54 – Grafické znázornění průměrné tloušťky vzorků filtrů Skupiny 5

PŘÍLOHA č. 4

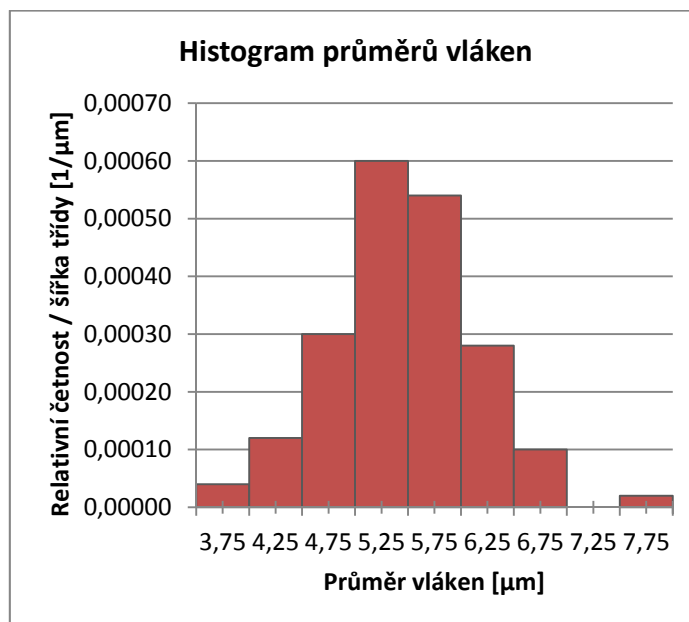
PRŮMĚR VLÁKEN – hodnoty, histogram

Tab. 20 – Hodnoty pro výpočet četnosti průměrů vláken

Interval	Střed intervalu	Absolutní četnost	Kumulativní absolutní četnost	Relativní četnost	Relativní četnost (%)	Kumulativní relativní četnost	Relativní četnost / šířka třídy
3,50 - 4,00	3,75	2	2	0,02	2	0,02	0,00004
4,00 - 4,50	4,25	6	8	0,06	6	0,08	0,00012
4,50 - 5,00	4,75	15	23	0,15	15	0,23	0,00030
5,00 - 5,50	5,25	30	53	0,30	30	0,53	0,00060
5,50 - 6,00	5,75	27	80	0,27	27	0,80	0,00054
6,00 - 6,50	6,25	14	94	0,14	14	0,94	0,00028
6,50 - 7,00	6,75	5	99	0,05	5	0,99	0,00010
7,00 - 7,50	7,25	0	99	0,00	0	0,99	0,00000
7,50 - 8,00	7,75	1	100	0,01	1	1,00	0,00002
Σ		100		1,00			

Tab. 21 – Vypočítané hodnoty z četnosti průměrů vláken

Minimum	3,7254
Maximum	7,8114
Modus	5,4283
Median	5,4740
Mean	5,4740
Veriační rozpětí Rv	4,0860
Smodch	0,6858
Rozptyl	0,4703



Obr. 55 – Histogram četností průměrů vláken

PŘÍLOHA č. 5

PLOŠNÁ HMOTNOST – tabulka hodnot

Tab. 22 –Hodnoty pro výpočet plošné hmotnosti

Vzorek	Váha [g]	Plocha [m ²]	Plošná hmotnost [g/m ²]	Průměr. váha [g]	S	S ²	95% IS	95% IS _H	95% IS _O	Průměr. plošná hmotnost [g/m ²]	S	S ²	95% IS	95% IS _H	95% IS _O
1.1	0,265	0,018	14,995												
1.2	0,259	0,018	14,656	0,311	0,049	0,002	0,048	0,359	0,263	17,598	2,799	7,832	2,743	20,341	14,856
1.3	0,351	0,018	19,862												
1.4	0,369	0,018	20,880												
2.1	1,417	0,018	80,183												
2.2	1,052	0,018	59,529	1,235	0,182	0,033	0,253	1,487	0,982	69,856	10,327	106,648	14,312	84,169	55,544
3.1	1,622	0,018	91,784												
3.2	1,178	0,018	66,659	1,469	0,175	0,031	0,171	1,640	1,297	83,112	9,898	97,963	9,699	92,811	73,412
3.3	1,587	0,018	89,803												
3.4	1,488	0,018	84,201												
4.1	2,892	0,018	163,649												
4.2	2,348	0,018	132,866	2,977	0,680	0,463	0,596	3,574	2,381	168,470	38,505	1482,650	33,751	202,221	134,719
4.3	2,139	0,018	121,039												
4.4	3,799	0,018	214,973												
4.5	3,708	0,018	209,823												
5.1	4,301	0,018	243,379												
5.2	4,863	0,018	275,181	4,818	0,346	0,120	0,339	5,157	4,479	272,635	19,587	383,665	19,195	291,830	253,439
5.3	5,276	0,018	298,551												
5.4	4,832	0,018	273,427												

PŘÍLOHA č. 6

EFEKTIVITA, TLAKOVÝ SPÁD, JÍMAVOST – tabulky hodnot

Tab. 23-1 – Tabulka hodnot pro výpočet efektivity, tlakového spádu, jímavosti

Vzorek		Před	1. dávka	2.dávka	3. dávka	4. dávka	5. dávka	6. dávka	7. dávka	Průměrná efektivita [%]	Ec [%]	Jímavost [g]
1.1	ABS F [g]	1,6218	1,665	1,6822	1,6978	1,7061						
	G1 [g]	x	0,0432	0,0172	0,0156	0,0083						
	ΣG2,n [g]	0	0,1472	0,2534	0,3730	0,4163						
	G2,n [g]	x	0,1472	0,1062	0,1196	0,0433						
	E [%]	x	70,65	83,80	86,96	80,83				80,56	81,92	0,3410
	FILTR [g]	0,265	0,369	0,458	0,562	0,597						
	Prach na filtru [g]	x	0,1040	0,0890	0,1040	0,0350						
	TLAK [Pa]	6	13	25	47	50						
1.2	ABS F [g]	1,6106	1,6506	1,6745	1,6928	1,7152	1,7352					
	G1 [g]	x	0,0400	0,0239	0,0183	0,0224	0,0200					
	ΣG2,n [g]	0	0,1170	0,2179	0,3162	0,4116	0,5086					
	G2,n [g]	x	0,1170	0,1009	0,0983	0,0954	0,0970					
	E [%]	x	65,81	76,31	81,38	76,52	79,38			75,88	76,65	0,3898
	FILTR [g]	0,259	0,336	0,413	0,493	0,566	0,643					
	Prach na filtru [g]	x	0,0770	0,0770	0,0800	0,0730	0,0770					
	TLAK [Pa]	4	9	17	28	39	50					
1.3	ABS F [g]	1,6200	1,6452	1,661	1,6709	1,6769						
	G1 [g]	x	0,0252	0,0158	0,0099	0,0060						
	ΣG2,n [g]	0	0,1122	0,2030	0,3059	0,3799						
	G2,n [g]	x	0,1122	0,0908	0,1029	0,0740						
	E [%]	x	77,54	82,60	90,38	91,89				85,60	85,60	0,3252
	FILTR [g]	0,351	0,438	0,513	0,606	0,674						
	Prach na filtru [g]	x	0,0870	0,0750	0,0930	0,0680						
	TLAK [Pa]	7	14	22	39	50						
1.4	ABS F [g]	1,6401	1,677	1,6913	1,6978							
	G1 [g]	x	0,0369	0,0143	0,0065							
	ΣG2,n [g]	0	0,2119	0,3422	0,3997							
	G2,n [g]	x	0,2119	0,1303	0,0575							
	E [%]	x	82,59	89,03	88,70					86,77	86,74	0,3467
	FILTR [g]	0,369	0,544	0,66	0,711							
	Prach na filtru [g]	x	0,1750	0,1160	0,0510							
	TLAK [Pa]	10	24	42	50							
Σ SKUP.1	Prům E	x	76,93	85,14	88,68	91,89						
	Prům Tlak	7,67	17,00	29,67	45,33	50,00						
	Prům Prach	0,0000	0,1571	0,2662	0,3595	0,3799						

Tab. 23-2 – Tabulka hodnot pro výpočet efektivity, tlakového spádu, jímavosti

Vzorek		Před	1. dávka	2.dávka	3. dávka	4. dávka	5. dávka	6. dávka	7. dávka	Průměrná efektivita [%]	Ec [%]	Jímavost [g]
2.1	ABS F [g]	1,6071	1,6214	1,6298	1,6346							
	G1 [g]	x	0,0143	0,0084	0,0048							
	ΣG2,n [g]	0	0,1383	0,2677	0,3995							
	G2,n [g]	x	0,1383	0,1294	0,1318							
	E [%]	x	89,66	93,51	96,36					93,18	93,27	0,3726
	FILTR [g]	1,417	1,541	1,662	1,789							
	Prach na filtru [g]	x	0,1240	0,1210	0,1270							
	TLAK [Pa]	19	28	38	50							
2.2	ABS F [g]	1,6346	1,6473	1,6594	1,6688	1,6743	1,6775					
	G1 [g]	x	0,0127	0,0121	0,0094	0,0055	0,0032					
	ΣG2,n [g]	0	0,0937	0,2788	0,4012	0,5127	0,6069					
	G2,n [g]	x	0,0937	0,1851	0,1224	0,1115	0,0942					
	E [%]	x	86,45	93,46	92,32	95,07	96,60			92,78	92,55	0,5617
	FILTR [g]	1,052	1,133	1,306	1,419	1,525	1,616					
	Prach na filtru [g]	x	0,0810	0,1730	0,1130	0,1060	0,0910					
	TLAK [Pa]	17	22	29	34	42	50					
Σ	Prům E	x	88,05	93,49	94,34	95,07	96,60					
SKUP.2	Prům Tlak	18	25	33,5	42	42	50					
	Prům Prach	0	0,1160	0,2733	0,4004	0,5127	0,6069					

Tab. 23-3 – Tabulka hodnot pro výpočet efektivity, tlakového spádu, jímavosti

Vzorek		Před	1. dávka	2.dávka	3. dávka	4. dávka	5. dávka	6. dávka	7. dávka	Průměrná efektivita [%]	Ec [%]	Jímavost [g]
3.1	ABS F [g]	1,5942	1,6012	1,6101	1,6141							
	G1 [g]	x	0,0070	0,0089	0,0040							
	ΣG2,n [g]	0	0,1330	0,2819	0,3739							
	G2,n [g]	x	0,1330	0,1489	0,0920							
	E [%]	x	94,74	94,02	95,65					94,80	94,55	0,3535
	FILTR [g]	1,622	1,748	1,888	1,976							
	Prach na filtru [g]	x	0,1260	0,1400	0,0880							
	TLAK [Pa]	26	32	40	50							
3.2	ABS F [g]	1,6699	1,6869	1,6964	1,7034	1,7119	1,7169	1,7186				
	G1 [g]	x	0,0170	0,0095	0,0070	0,0085	0,0050	0,0017				
	ΣG2,n [g]	0	0,1480	0,2355	0,3165	0,5020	0,6080	0,6757				
	G2,n [g]	x	0,1480	0,0875	0,0810	0,1855	0,1060	0,0677				
	E [%]	x	88,51	89,14	91,36	95,42	95,28	97,49		92,87	92,93	0,6279
	FILTR [g]	1,178	1,309	1,387	1,461	1,638	1,739	1,805				
	Prach na filtru [g]	x	0,1310	0,0780	0,0740	0,1770	0,1010	0,0660				
	TLAK [Pa]	18	22	26	33	37	46	50				
3.3	ABS F [g]	1,6918	1,7006	1,7044								
	G1 [g]	x	0,0088	0,0038								
	ΣG2,n [g]	0	0,1478	0,2566								
	G2,n [g]	x	0,1478	0,1088								
	E [%]	x	94,05	96,51						95,28	95,28	0,2445
	FILTR [g]	1,587	1,726	1,831								
	Prach na filtru [g]	x	0,1390	0,1050								
	TLAK [Pa]	30	39	50								
3.4	ABS F [g]	1,7044	1,7161	1,7222	1,7273							
	G1 [g]	x	0,0117	0,0061	0,0051							
	ΣG2,n [g]	0	0,1267	0,2538	0,3629							
	G2,n [g]	x	0,1267	0,1271	0,1091							
	E [%]	x	90,77	95,20	95,33					93,76	94,04	0,3413
	FILTR [g]	1,488	1,603	1,724	1,828							
	Prach na filtru [g]	x	0,1150	0,1210	0,1040							
	TLAK [Pa]	22	30	40	50							
Σ SKUP.3	Prům E	x	92,02	93,72	94,11	95,42	95,28	97,49				
	Prům Tlak	24	30,75	39	44,3333	37	46	50				
	Prům Prach	0	0,1389	0,2570	0,3511	0,5020	0,6080	0,6757				

Tab. 23-4 – Tabulka hodnot pro výpočet efektivity, tlakového spádu, jímavosti

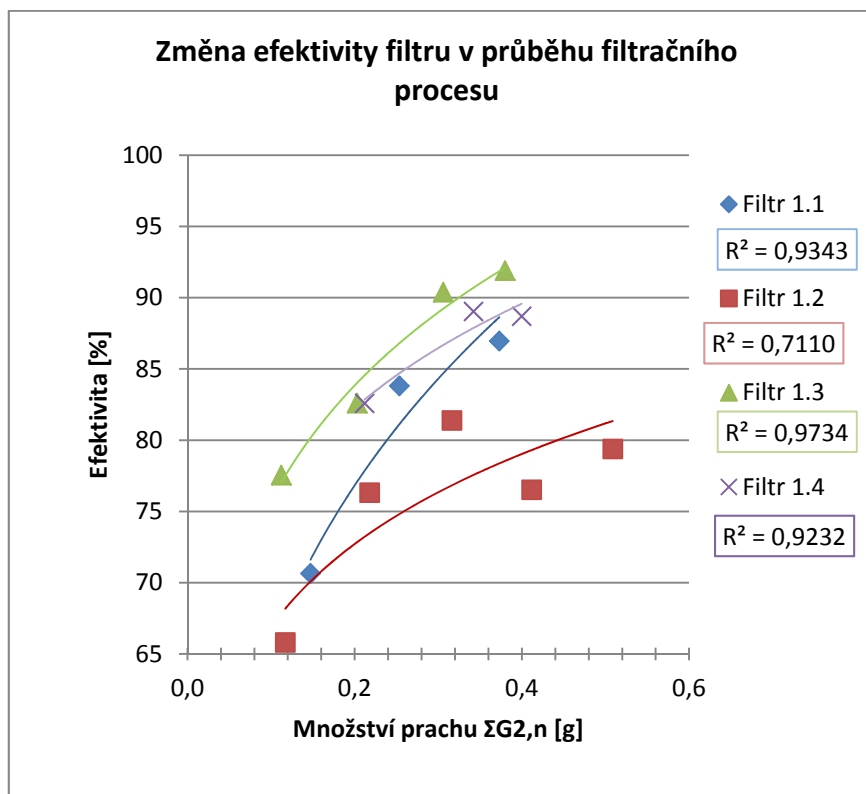
Vzorek		Před	1. dávka	2.dávka	3. dávka	4. dávka	5. dávka	6. dávka	7. dávka	Průměrná efektivita [%]	Ec [%]	Jímavost [g]
4.1	ABS F [g]	1,597	1,6038	1,6069	1,6142	1,6176	1,6207	1,6222	1,6242			
	G1 [g]	x	0,0068	0,0031	0,0073	0,0034	0,0031	0,0015	0,0020			
	ΣG2,n [g]	0	0,0698	0,2039	0,3222	0,4226	0,5177	0,6102	0,6992			
	G2,n [g]	x	0,0698	0,1341	0,1183	0,1004	0,0951	0,0925	0,0890			
	E [%]	x	90,26	97,69	93,83	96,61	96,74	98,38	97,75	95,89	96,02	0,6714
	FILTR [g]	2,892	2,955	3,086	3,197	3,294	3,386	3,477	3,564			
	Prach na filtru [g]	x	0,0630	0,1310	0,1110	0,0970	0,0920	0,0910	0,0870			
	TLAK [Pa]	39	43	51	58	66	75	88	100			
4.2	ABS F [g]	1,6242	1,6318	1,6371	1,6405	1,6475	1,6484	1,6496				
	G1 [g]	x	0,0076	0,0053	0,0034	0,0070	0,0009	0,0012				
	ΣG2,n [g]	0	0,1206	0,2249	0,3113	0,4483	0,5332	0,5604				
	G2,n [g]	x	0,1206	0,1043	0,0864	0,1370	0,0849	0,0272				
	E [%]	x	93,70	94,92	96,06	94,89	98,94	95,59		95,68	95,59	0,5357
	FILTR [g]	2,348	2,461	2,56	2,643	2,773	2,857	2,883				
	Prach na filtru [g]	x	0,1130	0,0990	0,0830	0,1300	0,0840	0,0260				
	TLAK [Pa]	34	40	48	55	76	96	100				
4.3	ABS F [g]	1,8011	1,8091	1,815	1,8201	1,8234	1,8254	1,8267				
	G1 [g]	x	0,0080	0,0059	0,0051	0,0033	0,0020	0,0013				
	ΣG2,n [g]	0	0,1100	0,2169	0,3190	0,4173	0,5133	0,5986				
	G2,n [g]	x	0,1100	0,1069	0,1021	0,0983	0,0960	0,0853				
	E [%]	x	92,73	94,48	95,00	96,64	97,92	98,48		95,87	95,81	0,5735
	FILTR [g]	2,139	2,241	2,342	2,439	2,534	2,628	2,712				
	Prach na filtru [g]	x	0,1020	0,1010	0,0970	0,0950	0,0940	0,0840				
	TLAK [Pa]	29	34	41	50	63	79	100				
4.4	ABS F [g]	1,8267	1,8314	1,8341	1,8355	1,8364	1,8386	1,8390				
	G1 [g]	x	0,0047	0,0027	0,0014	0,0009	0,0022	0,0004				
	ΣG2,n [g]	0	0,0897	0,1744	0,2528	0,3307	0,4049	0,8393				
	G2,n [g]	x	0,0897	0,0847	0,0784	0,0779	0,0742	0,4344				
	E [%]	x	94,76	96,81	98,21	98,84	97,04	99,91		97,60	98,02	0,8227
	FILTR [g]	3,799	3,884	3,966	4,043	4,12	4,192	4,626				
	Prach na filtru [g]	x	0,0850	0,0820	0,0770	0,0770	0,0720	0,4340				
	TLAK [Pa]	55	60	65	71	79	88	100				
4.5	ABS F [g]	1,7136	1,7178	1,7199	1,7221	1,7229	1,7263					
	G1 [g]	x	0,0042	0,0021	0,0022	0,0008	0,0034					
	ΣG2,n [g]	0	0,1262	0,2073	0,3015	0,3903	0,4087					
	G2,n [g]	x	0,1262	0,0811	0,0942	0,0888	0,0184					
	E [%]	x	96,67	97,41	97,66	99,10	81,52			94,47	97,19	0,3972
	FILTR [g]	3,708	3,83	3,909	4,001	4,089	4,104					
	Prach na filtru [g]	x	0,1220	0,0790	0,0920	0,0880	0,0150					
	TLAK [Pa]	62	69	73	84	95	100					
Σ SKUP.4	Prům E	x	93,62	96,26	96,16	97,22	97,66	98,92	97,75			
	Prům Tlak	43,8	49,2	55,6	63,6	75,8	84,5	97	100			
	Prům Prach	0	0,1033	0,2055	0,3014	0,4018	0,4923	0,6827	0,6992			

Tab. 23-5 – Tabulka hodnot pro výpočet efektivity, tlakového spádu, jímavosti

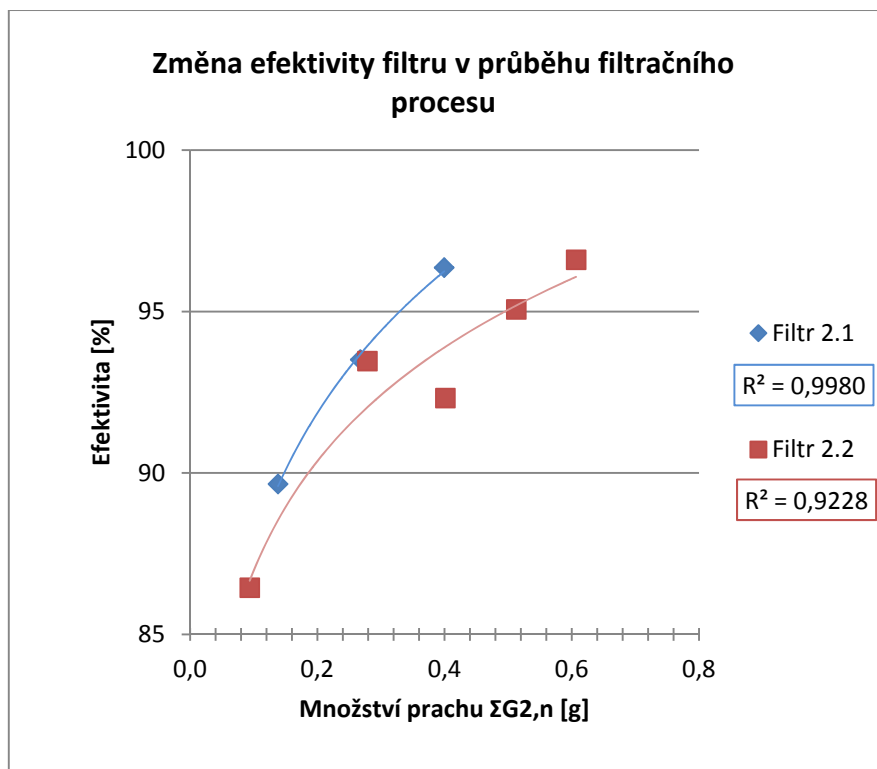
Vzorek		Před	1. dávka	2. dávka	3. dávka	4. dávka	5. dávka	6. dávka	7. dávka	Průměrná efektivita [%]	Ec [%]	Jímavost [g]
5.1	ABS F [g]	1,7080	1,7098	1,7115	1,7129	1,7142	1,7152					
	G1 [g]	x	0,0018	0,0017	0,0014	0,0013	0,0010					
	ΣG2,n [g]	0	0,0958	0,1805	0,3019	0,4162	0,4552					
	G2,n [g]	x	0,0958	0,0847	0,1214	0,1143	0,0390					
	E [%]	x	98,12	97,99	98,85	98,86	97,44			98,25	98,44	0,4481
	FILTR [g]	4,301	4,395	4,478	4,598	4,711	4,749					
	Prach na filtru [g]	x	0,0940	0,0830	0,1200	0,1130	0,0380					
	TLAK [Pa]	84	92	102	118	142	150					
5.2	ABS F [g]	1,6169	1,6197	1,6208	1,6215	1,6221						
	G1 [g]	x	0,0028	0,0011	0,0007	0,0006						
	ΣG2,n [g]	0	0,1148	0,2149	0,3166	0,4272						
	G2,n [g]	x	0,1148	0,1001	0,1017	0,1106						
	E [%]	x	97,56	98,90	99,31	99,46				98,81	98,92	0,4226
	FILTR [g]	4,863	4,975	5,074	5,175	5,285						
	Prach na filtru [g]	x	0,1120	0,0990	0,1010	0,1100						
	TLAK [Pa]	94	103	118	132	150						
5.3	ABS F [g]	1,5880	1,5913	1,5929	1,5944	1,5958						
	G1 [g]	x	0,0033	0,0016	0,0015	0,0014						
	ΣG2,n [g]	0	0,1103	0,2079	0,3084	0,3738						
	G2,n [g]	x	0,1103	0,0976	0,1005	0,0654						
	E [%]	x	97,01	98,36	98,51	97,86				97,93	98,09	0,3667
	FILTR [g]	5,276	5,383	5,479	5,578	5,642						
	Prach na filtru [g]	x	0,1070	0,0960	0,0990	0,0640						
	TLAK [Pa]	97	106	119	133	150						
5.4	ABS F [g]	1,6610	1,6660	1,6678	1,6693	1,6701	1,6705					
	G1 [g]	x	0,0050	0,0018	0,0015	0,0008	0,0004					
	ΣG2,n [g]	0	0,1020	0,2168	0,3093	0,4211	0,4535					
	G2,n [g]	x	0,1020	0,1148	0,0925	0,1118	0,0324					
	E [%]	x	95,10	98,43	98,38	99,28	98,77			97,99	98,06	0,4447
	FILTR [g]	4,832	4,929	5,042	5,133	5,244	5,276					
	Prach na filtru [g]	x	0,0970	0,1130	0,0910	0,1110	0,0320					
	TLAK [Pa]	88	94	109	122	148	150					
Σ	Prům E	x	96,95	98,42	98,76	98,87	98,10					
SKUP.5	Prům Tlak	90,75	98,75	112	126,25	147,5	150					
	Prům Prac	0,0000	0,1057	0,2050	0,3091	0,4096	0,4544					

PŘÍLOHA č. 7

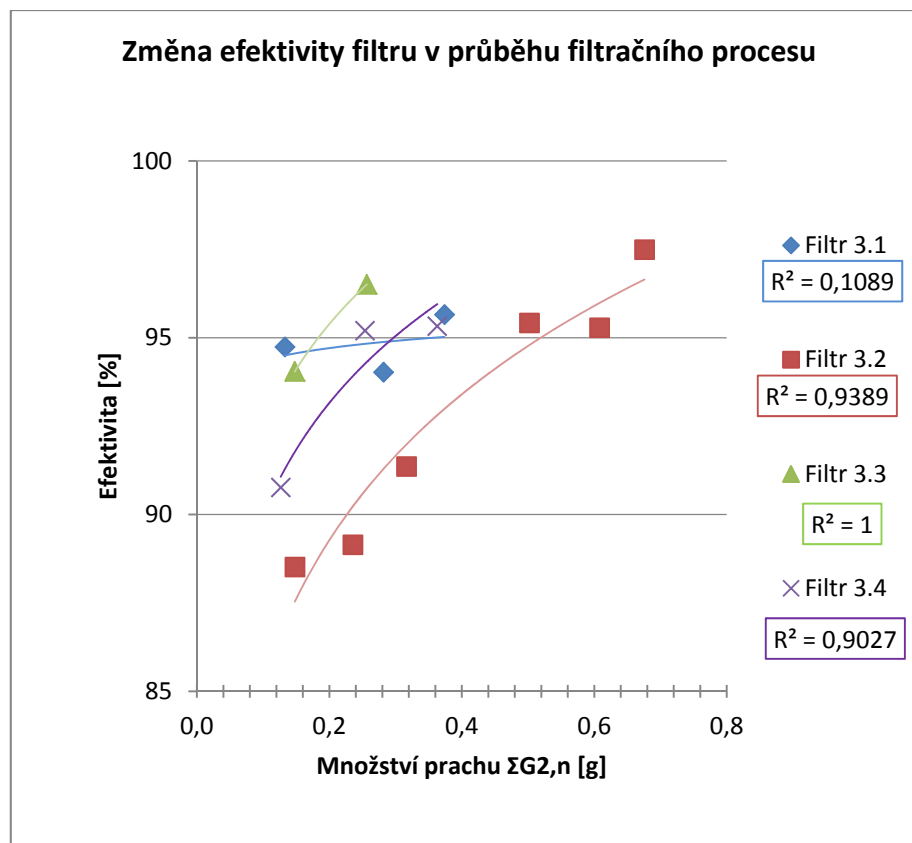
DFT-3 EFEKTIVITA – grafy



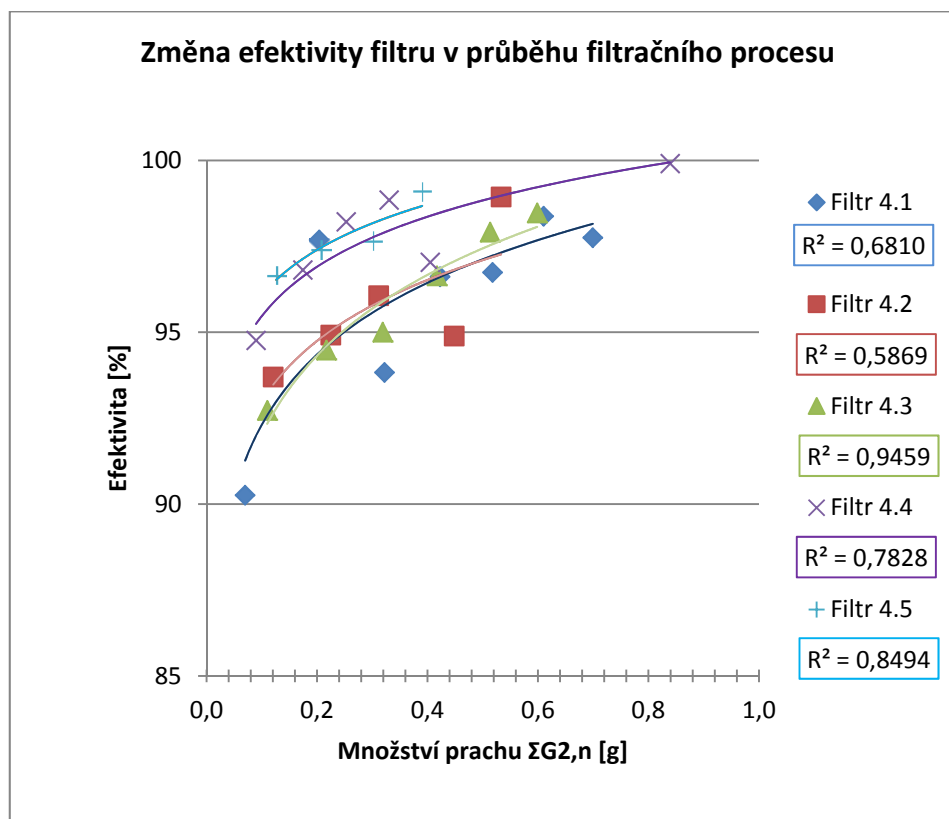
Obr. 56 – Grafické vyjádření změny efektivity v průběhu filtrace – Skupina vzorků 1



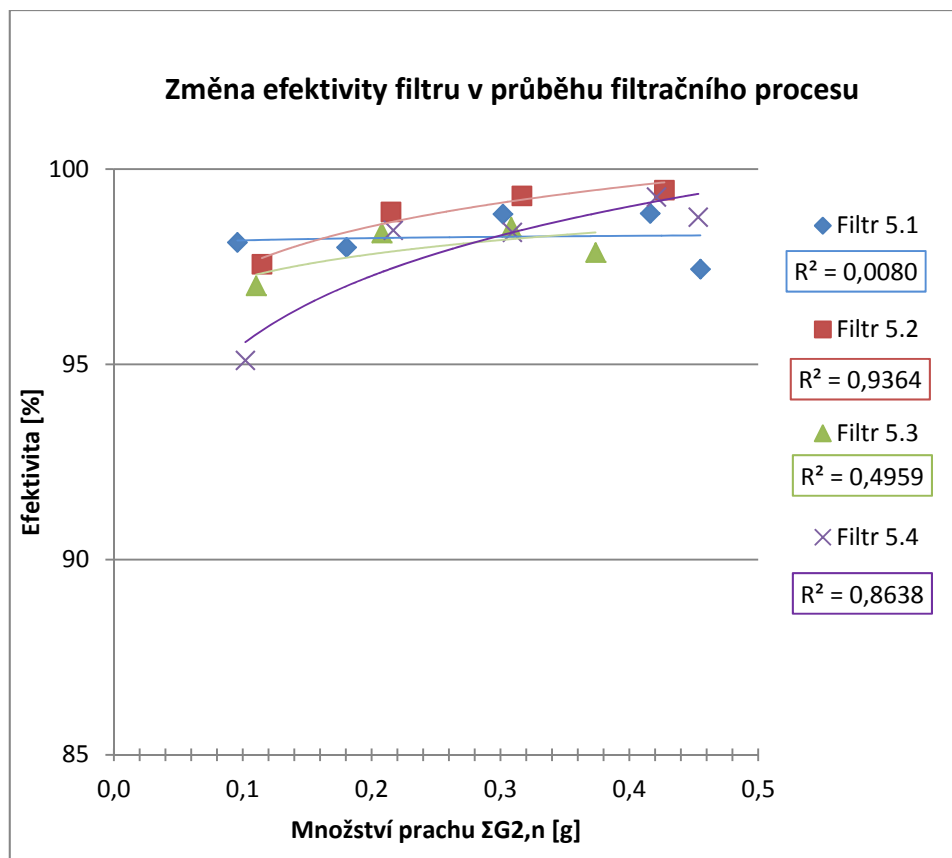
Obr. 57 – Grafické vyjádření změny efektivity v průběhu filtrace – Skupina vzorků 2



Obr. 58 – Grafické vyjádření změny efektivity v průběhu filtrace – Skupina vzorků 3



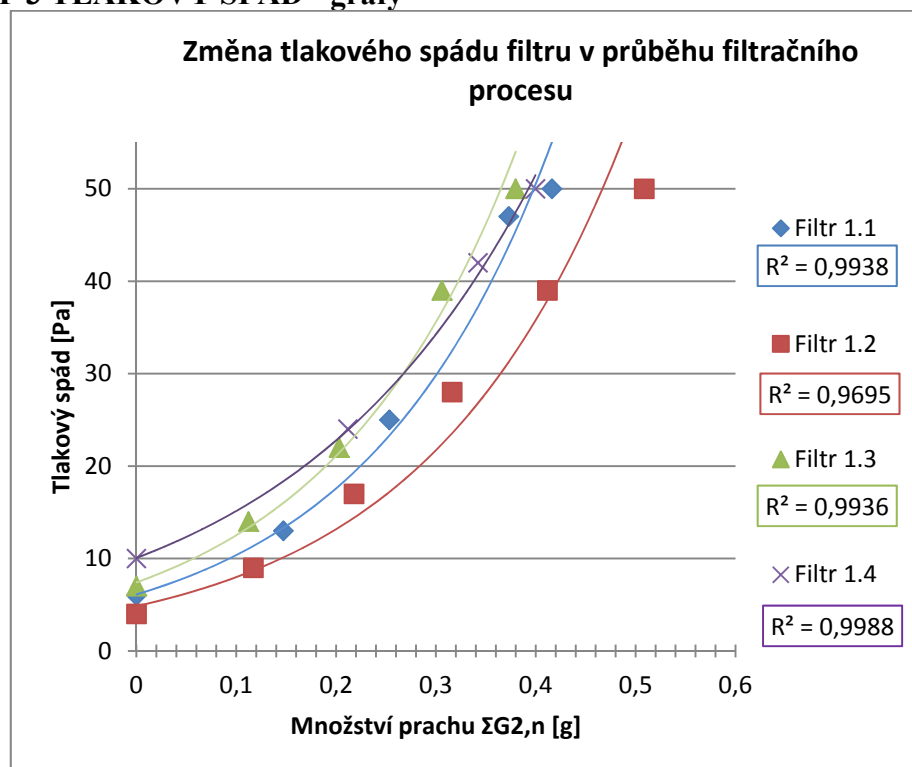
Obr. 59 – Grafické vyjádření změny efektivity v průběhu filtrace – Skupina vzorků 4



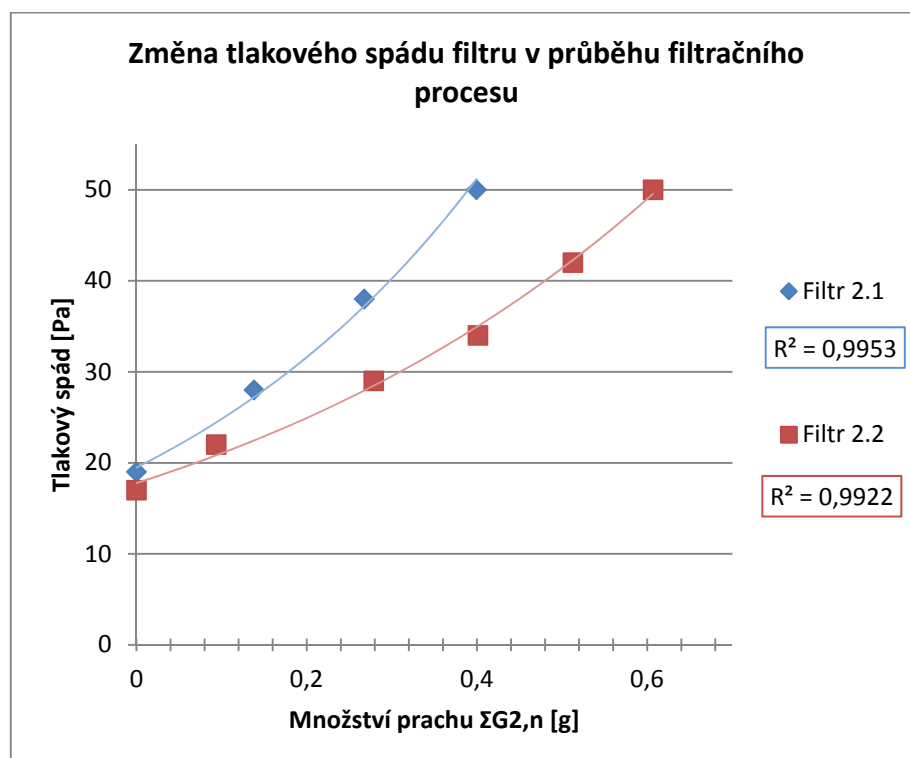
Obr. 60 – Grafické vyjádření změny efektivity v průběhu filtrace – Skupina vzorků 5

PŘÍLOHA č. 8

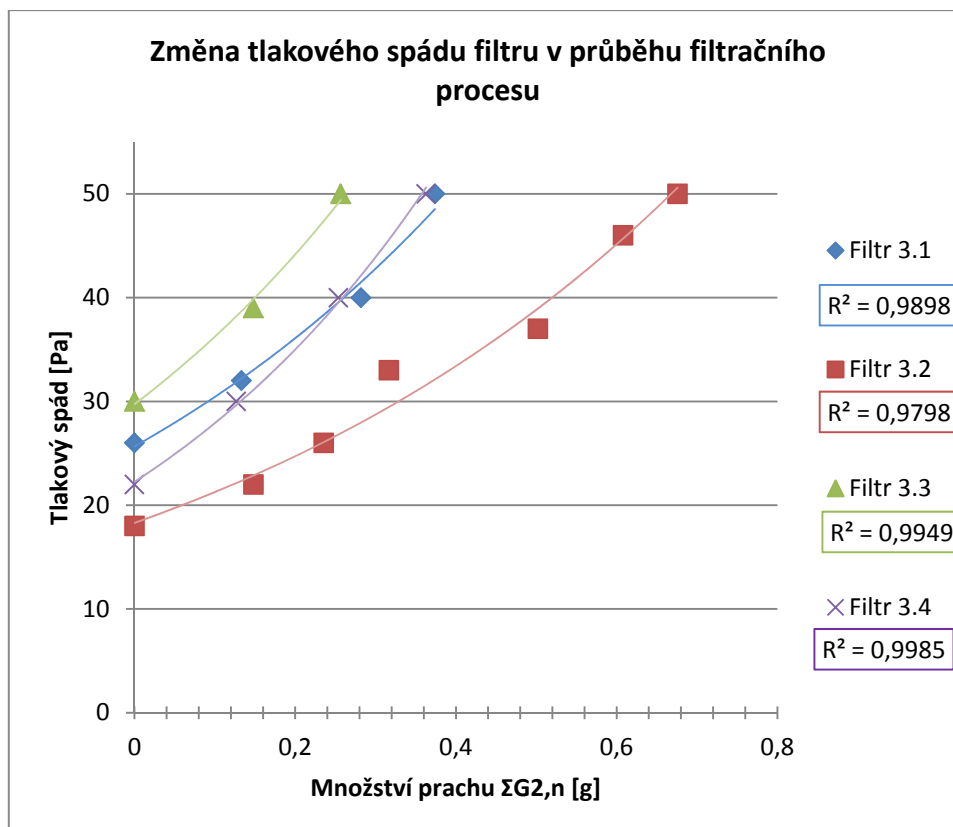
DFT-3 TLAKOVÝ SPÁD - grafy



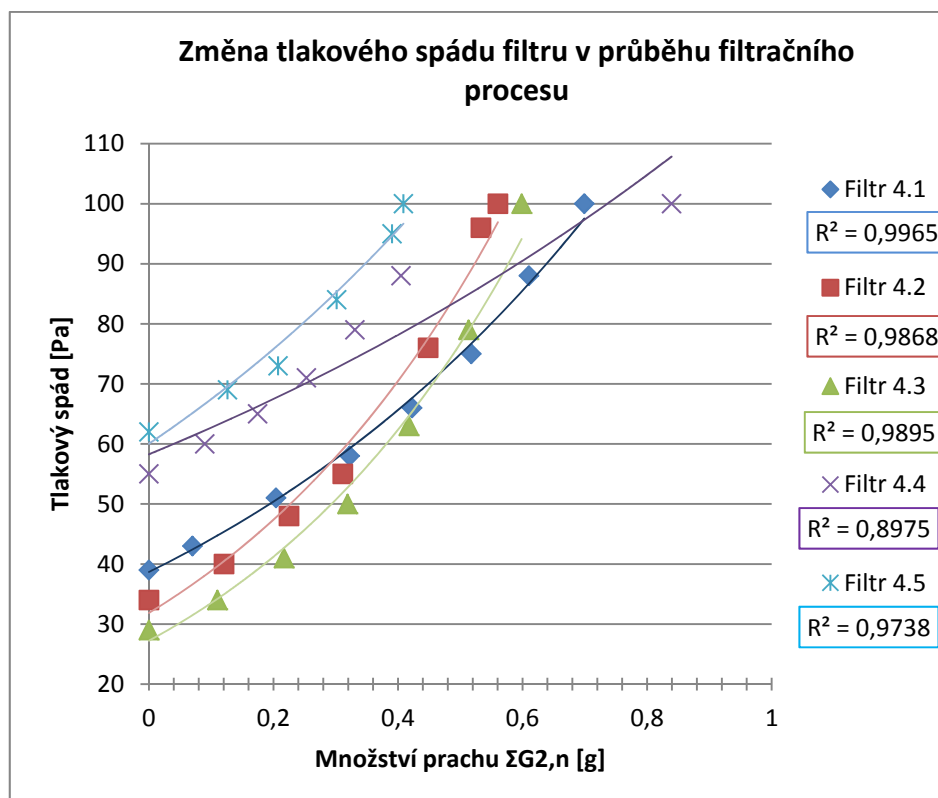
Obr. 61 – Grafické vyjádření změny tlakového spádu filtru v průběhu filtračního procesu – Skupina vzorků 1



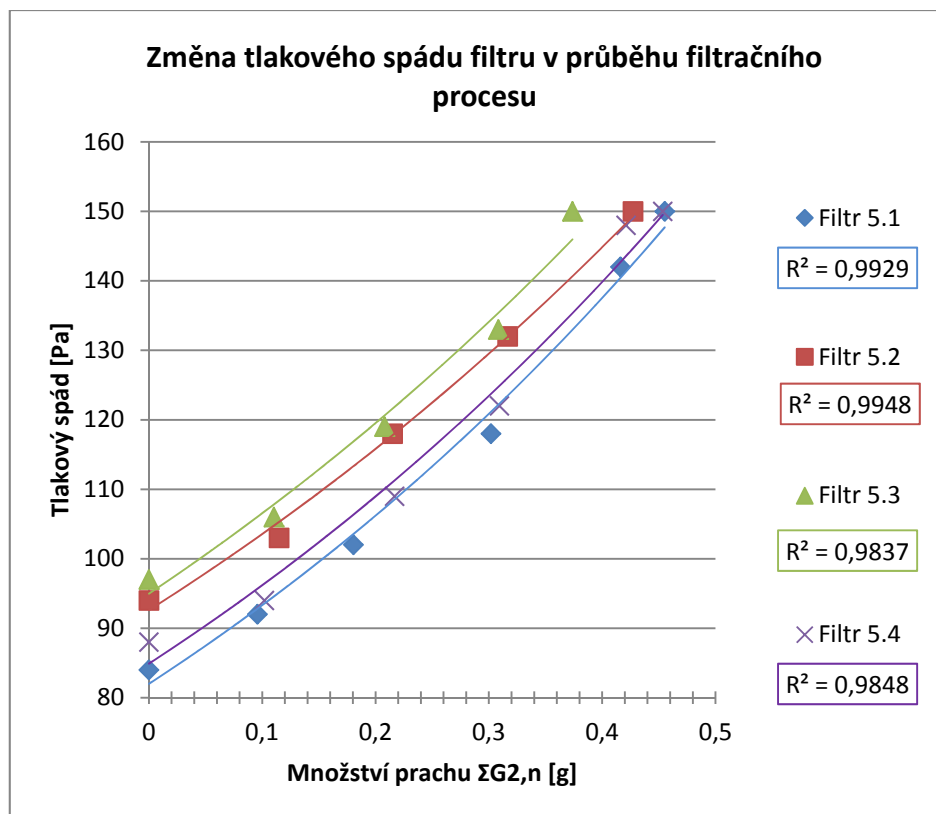
Obr. 62 – Grafické vyjádření změny tlakového spádu filtru v průběhu filtračního procesu – Skupina vzorků 2



Obr. 63 – Grafické vyjádření změny tlakového spádu filtru v průběhu filtračního procesu – Skupina vzorků 3



Obr. 64 – Grafické vyjádření změny tlakového spádu filtru v průběhu filtračního procesu – Skupina vzorků 4



Obr. 65 – Grafické vyjádření změny tlakového spádu filtru v průběhu filtračního procesu – Skupina vzorků 5